

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Snížení emisí NO_x na granulačním kotli o výkonu 135 t/h pomocí SNCR a posouzení vlivu
technologie na účinnost kotle

Decreasing of NO_x Emissions from Dry Bottom Boiler with Output 135 t/h Using SNCR
and Determination of Influence on Boiler Efficiency

Student:

Bc. Jiří Pecháček

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Stáňa, PhD

Ostrava 2010

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Pecháček**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Snížení emisí NO_x na granulačním kotli o výkonu 135 t/h pomocí SNCR a posouzení vlivu technologie na účinnost kotle**

Decreasing of NO_x Emissions from Dry Bottom Boiler with Output 135 t/h Using SNCR and Determination of Influence on Boiler Efficiency

Zásady pro vypracování:

Na granulační kotel o výkonu 135 t/h navrhnete systém umožňující dávkování aditiva, který pomocí metody SNCR zajistí snížení emisí NO_x o 50 – 60 %. Technologii navrhnete pro dva základní provozované výkony kotle, 100 a 80% jmenovitého výkonu. Dále zpracujete vliv navržené technologie na účinnost spalovacího zařízení.

- Zvolte vhodné aditivum pro SNCR. Stanovte množství aditiva v závislosti na požadovaném stupni redukce NO_x a spotřebu dalších médií. Navrhnete způsob regulace technologie SNCR.
- Na základě měření a s ohledem na požadované provozní výkonové hladiny navrhnete počet a umístění dávkovacích míst aditiva. Sestavte CFD model pro posouzení vhodnosti umístění dávkovacích míst a použitého systému dávkování (trysek). Navrhnete jednotlivé části technologie SNCR.
- Posuďte vliv technologie SNCR na účinnost spalovacího procesu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J. *Parní kotle*. SNTL Praha 1983.
- [2] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Vydavatelství ČVUT Praha 2002
- [3] Materiály ORGREZ, a.s.
- [4] ON 07 0147 Tepelný výpočet parných kotlov, Návrh oborové normy 1984
- [5] BUDAJ, F. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1973
- [6] Provozní předpis kotle
- [7] STÁŇA, M. *Výpočetní a diagnostické metody pro snižování emisí NO_x kotlů velkých výkonů*, Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, Disertační práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Stáňa, PhD.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010





prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě21.5. 2010.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2010


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce : Bc. Jiří Pecháček

Adresa trvalého pobytu autora práce : Klidná 497/5, Ostrava - Muglinov, 712 00

Poděkování

Za cenné rady, informace a připomínky při sestavování diplomové práce děkuji Ing. Tomáši Blejchařovi, PhD a Ing. Michalu Stáňovi, PhD. Dále bych chtěl poděkovat kolegům ve firmě ORGREZ, a.s., kteří se podíleli na realizaci technologie SNCR.

Bc. Jiří Pecháček

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PECHÁČEK, J. Snížení emisí NO_x na granulačním kotli o výkonu 135 t/h pomocí SNCR a posouzení vlivu technologie na účinnost kotle : diplomová práce. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 60 s. Vedoucí práce: Stáňa, M.

Diplomová práce se zabývá problémem snížení emisí NO_x pomocí technologie SNCR a posouzením vlivu technologie na účinnost kotle. Na základě platné legislativy jsou provozovatele povinni od roku 2016 provozovat spalovací zařízení s limity emisí NO_x pod 200 mg.m_N⁻³. V úvodu jsou srovnány dostupné možnosti snížení emisí NO_x, výběr vhodného aditiva. Z provedeného vstupního měření teplot a matematického modelu jsou určeny prostupy pro vstřikovací trysky. V práci je dále uveden popis jednotlivých prvků technologie a jejich funkce. Na základě provedených měření kotle je stanovena účinnost kotle s a bez technologie SNCR, porovnání a shrnutí přínosů technologie.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

PECHÁČEK, J. Decreasing of NO_x Emissions from Dry Bottom Boiler with Output 135 t/h Using SNCR and Determination of Influence on Boiler Efficiency. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2010 60 p. Thesis head: Stáňa, M.

Diploma thesis deals with problems of decreasing of NO_x emission by means of SNCR method and the influence technology on the efficiency of the boiler is evaluated. On the basis valid legislation are users obligatory operating firing equipment with limits NO_x emissions below 200 mg. m_N⁻³ since 2016. In the introduction are compared availability possibilities decreasing of NO_x emissions and acceptable additive is specified. The holes for injections nozzles are designed by means of completion temperature measuring. Individual elements of technology and their function are described. On the basis of completion measurement on boiler is specified boiler efficiency with and without technology SNCR compare and summary of technology benefit.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Popis procesu a metody SNCR.....	10
3	Popis kotle.....	13
3.1	Současný provoz	13
3.2	Stávající zařízení.....	13
4	Návrh prostupů do SK kotle	16
4.1	Měření teplot ve SK kotle	17
4.1.1	Výsledky měření teplot	20
4.2	Matematické modelování průběhu teplot ve SK kotle.....	22
4.3	Určení prostupů do SK kotle	30
4.3.1	Technické řešení prostupů	32
4.3.2	Vstřikovací tryska, popis funkce	33
5	Volba a potřebné množství aditiva	34
5.1	Výpočet minimální potřeby roztoku močoviny	35
6	Technologie SNCR, jednotlivé části technologie	37
6.1	Zásobní nádrž technologie SNCR.....	38
6.2	Oběhové čerpadlo a okružní potrubí.....	40
6.3	Míchací a měřicí modul	41
6.3.1	Přívod roztoku močoviny.....	42
6.3.2	Přívod demivody	43
6.3.3	Přívod tlakového vzduchu	43
6.3.4	Vytvoření směsi	44
6.4	Řídicí skříň technologie SNCR.....	44
6.5	Vstřikování směsi do SK kotle	46
6.6	Potrubní systémy.....	48
6.7	Regulace technologie SNCR	48
6.7.1	Ovládání technologie SNCR.....	50
6.8	Změna úrovně vstřikování	51
7	Vliv technologie SNCR na účinnost kotle	53
8	Závěr	58
9	Použitá literatura	59
10	Seznam příloh	60

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Popis
C	-	Variabilně nastavitelná pevná hodnota
$M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}$	kg.kmol^{-1}	Hmotnost $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
$M_{2\text{NO}}$	kg.kmol^{-1}	Hmotnost 2 NO
M_{NO}	kg.kmol^{-1}	Molární hmotnost NO
$\Delta\text{NO}_x\text{a}$	$\text{mg.m}_\text{N}^{-3}$	Měřená (aktuální) hodnota NO_x ve spalínách
$\Delta\text{NO}_x\text{b}$	$\text{mg.m}_\text{N}^{-3}$	Požadovaná hodnota NO_x ve spalínách
$\text{NO}_{x,1}$	$\text{mg.m}_\text{N}^{-3}$	Stávající obsah NO_x ve spalínách
$\text{NO}_{x,2}$	$\text{mg.m}_\text{N}^{-3}$	Požadovaný obsah NO_x ve spalínách
ΔNO_x	$\text{mg.m}_\text{N}^{-3}$	Stupeň redukce NO_x
$\Delta\text{NO}_{\text{sk}}$	$\text{mg.m}_\text{N}^{-3}$	Skutečné množství NO ve spalínách
$\text{O}_{2,\text{ref}}$	%	Obsah kyslíku referenční
$\text{O}_{2,\text{skut}}$	%	Obsah kyslíku ve spalínách skut.
P	%	Výkon kotle; rozsah 0-100 %
$Q_{\text{m,sk}}$	kg.h^{-1}	Skutečná spotřeba směsi
$Q_{\text{r,sk}}$	kg.h^{-1}	Skutečná spotřeba roztoku močoviny
	l.h^{-1}	
Q_{m}	kg.h^{-1}	Stechiometrická spotřeba roztoku močoviny
Q_{p}	MW	Přivedená energie
$Q_{\text{p,SNCR}}$	MW	Přivedená energie se SNCR
$Q_{\text{i,pal}}$	kJ.kg^{-1}	Výhřevnost paliva
$V_{\text{SP,v}}$	$\text{m}_\text{N}^3.\text{h}^{-1}$	Množství vlhkých spalín
$V_{\text{SP,s}}$	$\text{m}_\text{N}^3.\text{h}^{-1}$	Množství suchých spalín
c	%	Koncentrace roztoku močoviny
k	-	Variabilně nastavitelný faktor
$i_{\text{s},1}$	kJ.kg^{-1}	Entalpie vodné směsi roztoku
$i_{\text{s},2}$	kJ.kg^{-1}	Entalpie páry vzniklá ze směsi
$i_{\text{vz},1}$	kJ.kg^{-1}	Entalpie vzduchu při 20°C, tlaku 0,4 MPa
$i_{\text{vz},2}$	kJ.kg^{-1}	Entalpie vzduchu při teplotě spalín, tlaku 0,096 MPa
m_{pal}	kg.s^{-1}	Množství přivedeného paliva
m_{s}	kg.h^{-1}	Množství vstřikované vodné směsi roztoku močoviny
	kg.s^{-1}	
m_{vykon}	l.h^{-1}	Výkonový průtok roztoku močoviny

m_{vz}	$kg \cdot h^{-1}$	Celkové množství vzduchu přivedeného v tryskách
	$kg \cdot s^{-1}$	
$m_{p,SNCR}$	$kg \cdot s^{-1}$	Spotřeba paliva se SNCR
m_{reg}	$l \cdot h^{-1}$	Vstřikované množství roztoku močoviny dle regulační odchylky
m_{celk}	$l \cdot h^{-1}$	Výsledná celková hodnota průtoku močoviny
p_p	MPa	Tlak páry
p_s	MPa_{abs}	Tlak vodné směsi roztoku
t_p	$^{\circ}C$	Teplota páry
t_s	$^{\circ}C$	Teplota vodné směsi roztoku
t_{sp}	$^{\circ}C$	Teplota spalin za kotlem
w	%	Obsah vody ve spalinách
α	-	Stechiometrický přebytek aditiva
ρ_r	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota vodného roztoku močoviny
ξ_{CO}	%	Ztráta hořlavinou ve spalinách
	MW	
ξ_{Cp}	%	Ztráta hořlavinou v popílku
	MW	
$\xi_{Cš}$	%	Ztráta hořlavinou ve škváře
	MW	
ξ_f	%	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
	MW	
ξ_{sv}	%	Ztráta sdílením tepla do okolí
	MW	
ξ_k	%	Ztráta komínová
	MW	
$\Sigma \xi_i$	%	Celkové ztráty
	MW	
ξ_{SNCR}	%	Ztráta vlivem SNCR
	MW	
η_k	%	Účinnost kotle bez SNCR
η_{SNCR}	%	Účinnost kotle se SNCR
$\Delta \eta$	%	Rozdíl účinnosti kotle bez a se SNCR
Δm_p	$kg \cdot s^{-1}$	Zvýšení spotřeby paliva se SNCR
	$kg \cdot h^{-1}$	

1 Úvod

Zadání diplomové práce vychází z uskutečněné realizace firmy ORGREZ, a.s., na dodávku technologie snižující emise oxidů dusíků (dále NO_x) na kotli o jmenovitém výkonu $135 \text{ t}_{\text{páry}} \cdot \text{h}^{-1}$. Diplomová práce řeší problematiku realizace technologie SNCR, popis funkcí jednotlivých zařízení a vliv technologie SNCR na celkovou účinnost kotle.

Snižování emisí a zvyšování účinnosti energetických zdrojů je jedním z cílů environmentální politiky ČR. V nejbližším časovém období bude na základě závěrů „Národního programu snižování emisí“ kladen důraz především na snižování emisí NO_x , kdy provozovatelé velké energetiky budou muset postupně do roku 2016 dosáhnout emisních limitů méně než $200 \text{ mg} \cdot \text{m}_N^{-3}$.

Emise NO_x mohou být redukovány na současných spalovacích zařízeních dvěma základními způsoby dle toho, v jaké fázi jsou redukovány. Primární redukce NO_x je způsob redukce, který redukuje tyto emise úpravami spalovacího procesu jako je např. instalace nízko emisních hořáků, úprava vzduchového režimu, fázování spalování atd. Sekundární redukcí rozumíme provedení redukce již vzniklých emisí NO_x ještě ve SK nebo až v dalších partiích komplexu spalovacího zařízení např. pomocí NH_2^- radikálů. Do této oblasti spadají technologie jako SNCR a SCR. Výsledným produktem reakcí pak je N_2 a H_2O . Pro stávající zařízení je vybrána metoda SNCR s využitím roztoku technické močoviny.

Základní mechanismy technologie jsou známy již od 70 – tých let minulého století, avšak v současné době vzhledem k výše uvedeným požadavkům na omezování emisí NO_x znovu získává na aktuálnosti zejména u starších tepelných zdrojů.

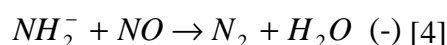
Firma ORGREZ, a.s. ve spolupráci s firmou M&S (Mehldau & Steinfath), dále pro jednoduchost a přehlednost bude v textu uvedeno ORGREZ, a.s., zajišťuje celkový návrh na řešení sekundárních opatření snižující emise NO_x daných zařízení. Dodávku, servis a nastavení technologie SNCR s použitím reagentu ve formě roztoku močoviny nebo čpavkové vody.

2 Popis procesu a metody SNCR

Na základě budoucích platných legislativních limitů pro emise Oxidů dusíku NO_x je v současnosti naléhavě řešena otázka jejich snižování. Existují dvě základní možnosti snižování emisí, a to:

1. Primární opatření
2. Sekundární opatření

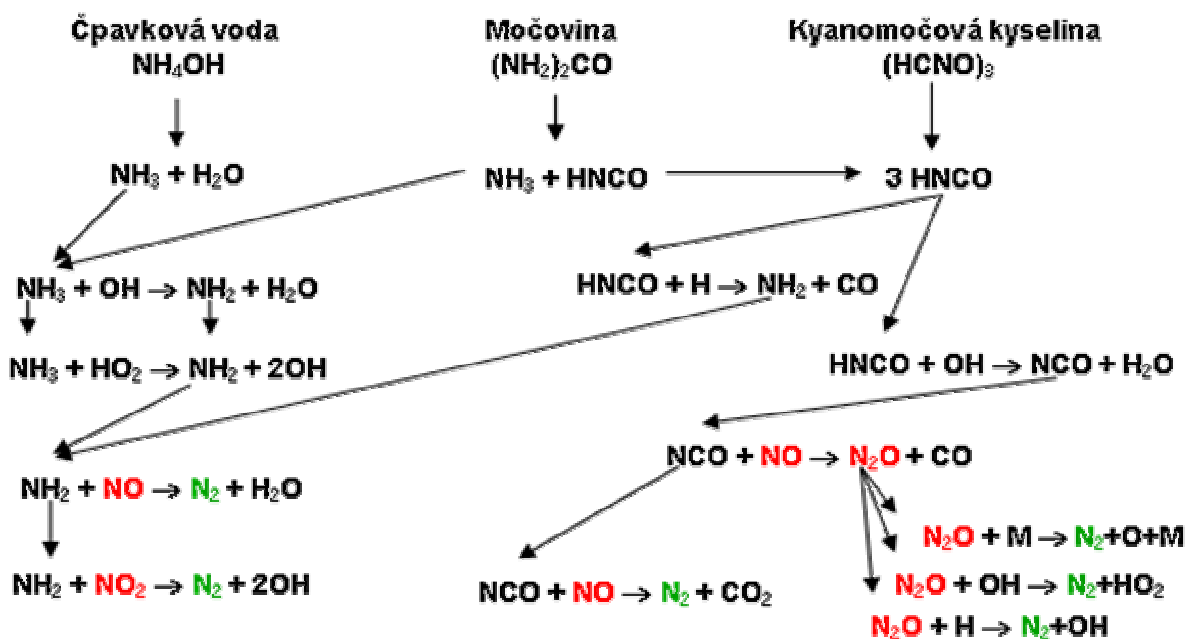
Primární opatření spočívá v zamezení vzniku NO_x během procesu hoření. Jedná se např. o nízkoemisní hořáky. Primární opatření byla vyvinuta k redukci tvorby NO_x řízením spalování (postupným přívodem kyslíku k palivu), zatímco sekundární opatření jsou koncovými technikami snižování emisí NO_x . Sekundární opatření tedy spočívá v chemickém odstranění NO_x ze spalin. Všechny sekundární metody jsou založeny na reakci radikálů NH_2^- s NO za vzniku molekulárního dusíku N_2 a vody H_2O .



V současnosti jsou jako zdroj radikálů NH_2^- využívány tři látky.

- 1) Čpavková voda NH_4OH
- 2) Močovina $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
- 3) Kyanomočová kyselina $(\text{HNCO})_3$.

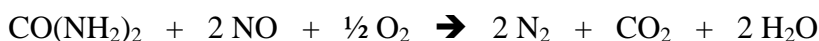
Reakční schéma pro všechny tři reagenty je přehledně zobrazeno na **Obr. 1**. Ve skutečnosti je však chemismus mnohem složitější a reálně dochází k cca 150 reakcím. Hlavním problémem SNCR metody je relativně úzké teplotní okno ($850\text{--}1050^\circ\text{C}$). Pokud je reagent vstřikován do oblasti s nízkou teplotou, Oxidy dusíku NO_x nereagují s radikálem NH_2^- , protože reakční rychlost je nízká. To má za následek zvýšení koncentrace čpavku (amoniaku) NH_3 ve spalinách tzv. čpavkový skluz. Pokud je naopak reagent vstřikován do oblasti s vysokou teplotou, NH_2^- radikál začne přednostně reagovat s kyslíkem O_2 , což má za následek zvýšení koncentrace NO_x ve spalinách. Účinnost metody SNCR je tak silně ovlivněna teplotou spalin, respektive umístěním trysek ve spalovací komoře.



Obr. 1 Reakční schéma u metody SNCR [4]

Fy ORGREZ, a.s. využívá pro redukci NO_x metodu vstřikování vodného roztoku močoviny se speciální přísadou (NOxAMID) nebo čpavkové vody do proudu spalin ve spalovací komoře.

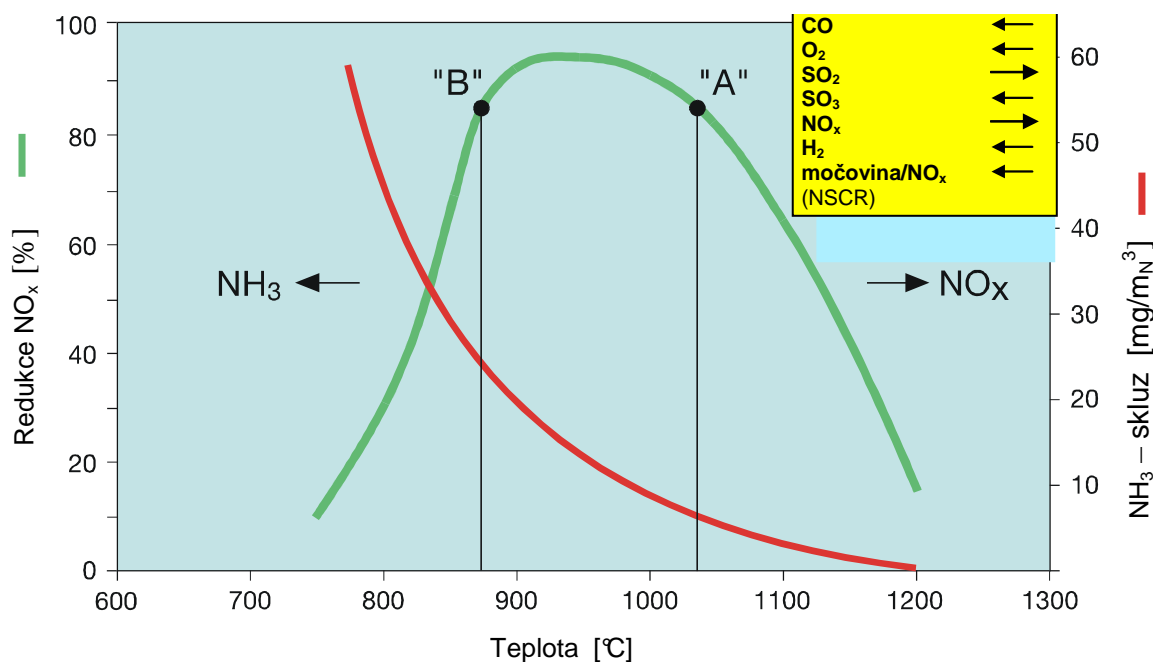
V obou případech je výsledkem reakce ve spalinách molekulární dusík, vodní pára a oxid uhličitý podle následující chemické reakce.



Všechny produkty reakce jsou přirozenou součástí atmosféry. K reakcím s významnou redukcí NO_x dochází za teplot v rozmezí “teplotního okna” 850 – 1 050 °C. Tento teplotní rozsah se může mírně měnit v závislosti na složení spalin a zdali je použit jako reagent roztok močoviny nebo čpavková voda – viz **Obr. 2**.

Hlavní vliv mají plyny CO a O_2 , které posouvají teplotní okno směrem k nižším teplotám a SO_2 , který posouvá teplotní okno směrem k vyšším teplotám.

Při nižších teplotách, než je teplotní rozmezí, vyžaduje redukční reakce delší reakční čas, který ovšem ve většině případů komerčních spalovacích systémů není k dispozici. Rovněž by docházelo ke snížení redukční schopnosti a zvýšení zbytkového čpavku ve spalinách. V levé části křivky se redukční schopnost zvyšuje s teplotou, ale obsah zbytkového čpavku je stále vysoký.



„A“ – optimální teplota pro SNCR (nízký zbytkový NH_3)
 „B“ – optimální teplota pro SNCR + SCR (vysoký zbytkový NH_3)

Obr. 2 Závislost teploty na účinnosti technologie SNCR a skluzu NH_3 [1]

Na vrcholu křivky mezi body A a B jsou optimální podmínky pro redukci NO_x , podíl zbytkového NH_3 ve spalinách klesá. Teplotní změny v této oblasti mají pouze malý vliv na účinnost procesu.

Zvýšení teploty nad optimum snižuje redukční schopnost, ale také snižuje podíl zbytkového NH_3 na velmi nízké hodnoty.

Doporučuje se provoz při teplotách napravo od bodu “B” za účelem dosažení minimalizace podílu čpavku, přestože redukce NO_x je nižší než dosažitelné maximum.

Přítomnost NH_3 může vést k tvorbě amonných solí (síran amonný, hydrogensíran amonný a chlorid amonný), které mohou způsobit sekundární problémy se zanášením teplosměnných ploch ekonomizéru a ohříváku spalovacího vzduchu.

Cílem všech technik redukce NO_x je dosažení co nejvyšší účinnosti při co nejnížší spotřebě reagentu a současně při dosažení co nejnižší zbytkové hladiny NH_3 ve spalinách. Toho se dosáhne dávkováním správného množství reagentu při správné teplotě spalin (tzn. do správného místa ve spalovací komoře).

3 Popis kotle

Kotel je součástí kotelný teplárny, kde je instalováno 8 parních kotlů, každý o výkonu 135 t/h páry. Projektová koncentrace oxidů dusíku ve spalinách za kotli je 375 mg/m_R^3 (normální stavové podmínky, 6 % O_2 , suché spaliny). Redukce emise oxidů dusíku z kotle je zajišťována na principu zónového spalování.

Za kotlem je elektrostatický odlučovač popílku a spalinový ventilátor. Spaliny všech kotlů jsou zavedeny do směšovací komory, ze které vstupují do dvou identických odsiřovacích linek, nebo v případě poruchy, do obtoku. Odsiřovací linky pracují na principu polosuché vápenné metody provenience NIRO/NOEL KRC s projektovanými parametry výstupních koncentrací $\text{SO}_2 = 360 \text{ mg/m}_R^3$. Spaliny obou linek a obchvatu jsou zavedeny do komínu výšky 150 m.

Současná emise oxidů dusíku teplárny (jako jednoho zdroje) v roce 2005 činila 2 515 t, průměrná emisní koncentrace oxidů dusíku za linkami odsíření byla 359 a 354 mg/m_R^3 .

Ve smyslu platné legislativy je pro teplárnu stanoven s platností od 1.1.2016 emisní strop 1 040 t/rok oxidů dusíku. Oproti roku 2005 se předpokládá zvýšení výroby páry v kotelně o cca 10 – 15%.

3.1 Současný provoz

Kotel je provozován v rozsahu výkonu 60 – 100 % jmenovitého výkonu. Při normálním provozu kotle jsou provozovány 3 ze 4 uhelných mlýnů a oba vzduchové ventilátory.

3.2 Stávající zařízení

Základní parametry :

Tepelný výkon	95,8 MW
Odpovídající parní výkon kotle	135 t/h
Jmenovitý tlak přehřáté páry	9,41 MPa
Jmenovitá teplota	540°C
Množství spalin	186 000 m_N^3/h
Počet práškových hořáků	4
Počet plynových hořáků	4

Počet mlýnů	4
Garantovaná hodnota O ₂ ve spalínách	5,37 % obj.
Garantovaná hodnota NO _x ve spalínách	375 mg/m _R ³ (400 u K 19 a 20)
Garantovaná hodnota CO ve spalínách	250 mg/m _R ³
Jmenovitá teplota napájecí vody	215°C

Granulační vysokotlaký parní kotel s práškovým topením, s přímým foukáním prášku a zapalováním topným plynem. Kotel je projektován pro spalování hnědého uhlí z dolů severočeské hnědouhelné pánve.

Spalovací komora je tvořena čtyřmi stěnami výparníku, které jsou membránového provedení. Spalovací komora je zavěšena na stropě nosné konstrukce kotle a dilatuje směrem dolů.

Kotel je vybaven čtyřmi práškovými šterbinovými hořáky, které jsou umístěny v rozích spalovací komory nad podlažím + 8,0 m a jsou tangenciálně nasměrovány na pomyslnou kružnici uprostřed spalovací komory o průměru 900 mm. Do vzduchových dyšen každého hořáku je přiváděn horký spalovací vzduch (382°C), který se dá seřadit vhodným nastavením klapek ovládaných buďto ručně, nebo automatickou regulací. Do každého hořáku je přiváděn uhelný prášek práškovody ze dvou tlukadlových mlýnů.

V každé boční stěně výparníku jsou umístěny dva zapalovací a zároveň stabilizační plynové hořáky. Tyto jsou umístěny a nasměrovány tak, aby spolehlivě zapalovaly primární směs, případně stabilizovaly plamen práškových hořáků. Palivem je tzv. „topný plyn“, který je směsí odpadních plynů z provozu chemických zařízení a lze jej v případě potřeby doplnit nebo nahradit zemním plynem případně ve směsi s dusíkem.

Spalovací vzduch je nasáván dvěma radiálními ventilátory RVI 1600 nasávacími šachtami z kotelny nebo z venkovního prostředí. V ústí nasávacích šachet jsou zabudovány ručně ovládané jazýčkové klapky. Nastavením těchto klapek lze nasávat vzduch z venkovního prostoru nebo z objektu kotelny, popř. namíchat vhodný poměr dle potřeby kotle. Výkon ventilátorů je regulován regulačním ústrojím ovládaným servopohonem. Každý ventilátor je projektován na 50% potřebného množství vzduchu pro kotel. Pro měření celkového množství spalovacího vzduchu jsou v nasávacích šachtách zabudovány anubary. Za těmito měřidly je na nasávací šachty připojeno potrubí recirkulace vzduchu. Za vzduchovými ventilátory jsou vzduchová potrubí propojena, aby bylo možno při najíždění nebo poruše jednoho ventilátoru, provozovat kotel pouze s jedním ventilátorem. Spalovací vzduch je dále dopravován do parních ohříváků vzduchu.

V parních ohřívacích vzduchu se vzduch předeřívá na cca 40°C. Parní ohříváky vzduchu se používají pouze při uvádění kotle do provozu nebo při takovém provozu kotle, kdy není možno zajistit předeřívání vzduchu recirkulací horkého vzduchu na 40°C. Za parními ohříváky vzduchu je odebírán vzduch pro spalovací a stabilizační plynové hořáky. Před parními ohříváky vzduchu je odebírán studený vzduch do mlýnských okruhů.

Z parních ohříváků se vzduch přivádí do regeneračního ohříváku vzduchu typu Ljungström, ve kterém se ohřívá na 382°C. Takto ohřátý vzduch se vede potrubími jako sekundární vzduch do práškových hořáků, dále do mlýnských okruhů a do dyšen terciálního (vyhořívacího) vzduchu. Vhodné využívání těchto dyšen má vliv na omezení tvorby NO₂. Ohřívák vzduchu Ljungström je vybaven dvěma obtokovými vzduchovými potrubími. Tyto obtoky se používají při uvádění kotle do provozu.

Kotel je provozován s podtlakem na straně spalin. Spaliny vzniklé hořením paliva proudí topeništěm přes šotový přehřívák č.3, výstupní přehřívák č.4, konvekční přehřívák č. 2 a přehřívák č.1 (skládá se ze stěnové a stropní části, která je membránového provedení a přehřívákové mříže), ohřívák vody (ekonomizér) a regenerační ohřívák vzduchu, dále přes elektroodlučovač popílku, spalinový ventilátor a odsíření spalin do komína.

Podtlak ve spalovací komoře je udržován na hodnotě -90 Pa automaticky spalinovým ventilátorem RVM 2500.

Hnědé uhlí :

Výhřevnost	10 470÷11 740 kJ/kg
Obsah vody	26÷27 % obj.
Obsah popela	28÷33 % obj.
Obsah síry	1÷1,4 % obj.
Melitelnost podle VTI	1,3÷1,5
Spotřeba paliva jednoho kotle	37,5 t/h

Topný plyn :

Pro zapalování a stabilizaci hoření kotle je používána směs odpadních plynů z provozu chemických zařízení o následující průměrné výhřevnosti a složení (objemová procenta):

<i>SLOŽKA</i>	<i>OBJEMOVÉ</i>		<i>KOLÍSÁNÍ (%)</i>	
	<i>SLOŽENÍ (%)</i>	<i>MIN.</i>	<i>MAX.</i>	
Výhřevnost		12 000	23 000	kJ/m_N^3
CO ₂	4,4	0,8	22,4	
C _x H _y	1,8	0,4	4,8	
O ₂	0,6	0,2	1,4	
CO	1,9	0,8	4,0	
H ₂	51,6	36,6	67,7	
CH ₄	21,5	12,0	27,4	
N ₂	18,0	7,3	32,4	

V případě nedostatku odpadních plynů z provozu chemických výrob jsou tyto odpliny nahrazovány směsí zemního plynu a dusíku.

4 Návrh prostupů do SK kotle

Správná volba umístění vstřikovacích trysek sloužících k dopravení a rozstříku roztoku močoviny ve SK, je velmi důležitou částí metody snižování NO_x pomocí technologie SNCR. Pokud by vstřikovací trysky nebyly vhodně umístěny, byla by metoda SNCR neefektivní a tudíž nepoužitelná pro snižování NO_x ve spalínách. Trysky musí rozprašovat roztok močoviny ve vhodném rozmezí teplot, ve kterých probíhá redukce NO_x pomocí roztoku močoviny a musí se jimi zajistit co nejvyšší pokrytí průřezu SK kotle.

Pro správnou volbu umístění prostupů do SK kotle je potřeba zohlednit pro jednotlivé provozy kotle, neboť při 100% jmenovitého výkonu kotle je teplotní pole ve SK jiné, než při výkonu 60%. Tyto změny teplotního pole je tedy potřeba zohlednit, protože technologie SNCR bude v pracovat v režimu od 60% do 100% jmenovitého výkonu kotle.

Veškerá měření a simulace byly prováděny pro více stavů kotle tak, aby se zajistila správná funkčnost technologie při změně výkonu kotle.

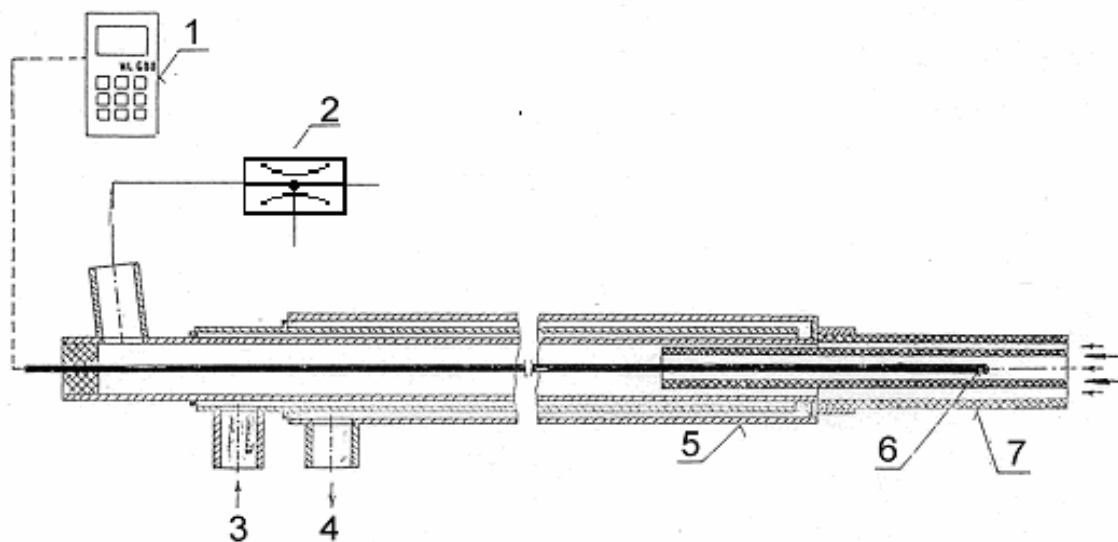
Navržené umístění vstřikovacích trysek vychází z :

- provedeného měření teplot ve SK
- matematické simulace provedené v programu ANSYS/CFX
- z provozních zkušeností firmy ORGREZ, a.s.

4.1 Měření teplot ve SK kotle

Měření teplot bylo provedeno pro 135, 125, 115, 95 a 80 $t_{\text{páry}} \cdot \text{h}^{-1}$, a je tak pokryt celkový rozsah provozních režimů kotle (od 60% po 100% jmenovitého výkonu kotle).

Měření teplot bylo realizováno pomocí prosávacího pyrometru o délce 3 m a průměru 21,3 mm, viz Obr. 3. Prosávací pyrometr se skládá z vodou chlazené vsuvky, v jejímž středu se nachází termočlánek (Ni-CrNi). Špička termočlánu se nachází v keramickém pouzdře s otvorem. Tento otvor umožňuje nasávání horkých spalín podél termočlánu. K tomu potřebný podtlak je vytvářen pomocí ejektoru se stlačeným vzduchem, který je připojen na odsávací pyrometr.



1 – digitální teploměr, 2 – ejektor, 3 – vstup chladicí vody, 4 – výstup chladicí vody,

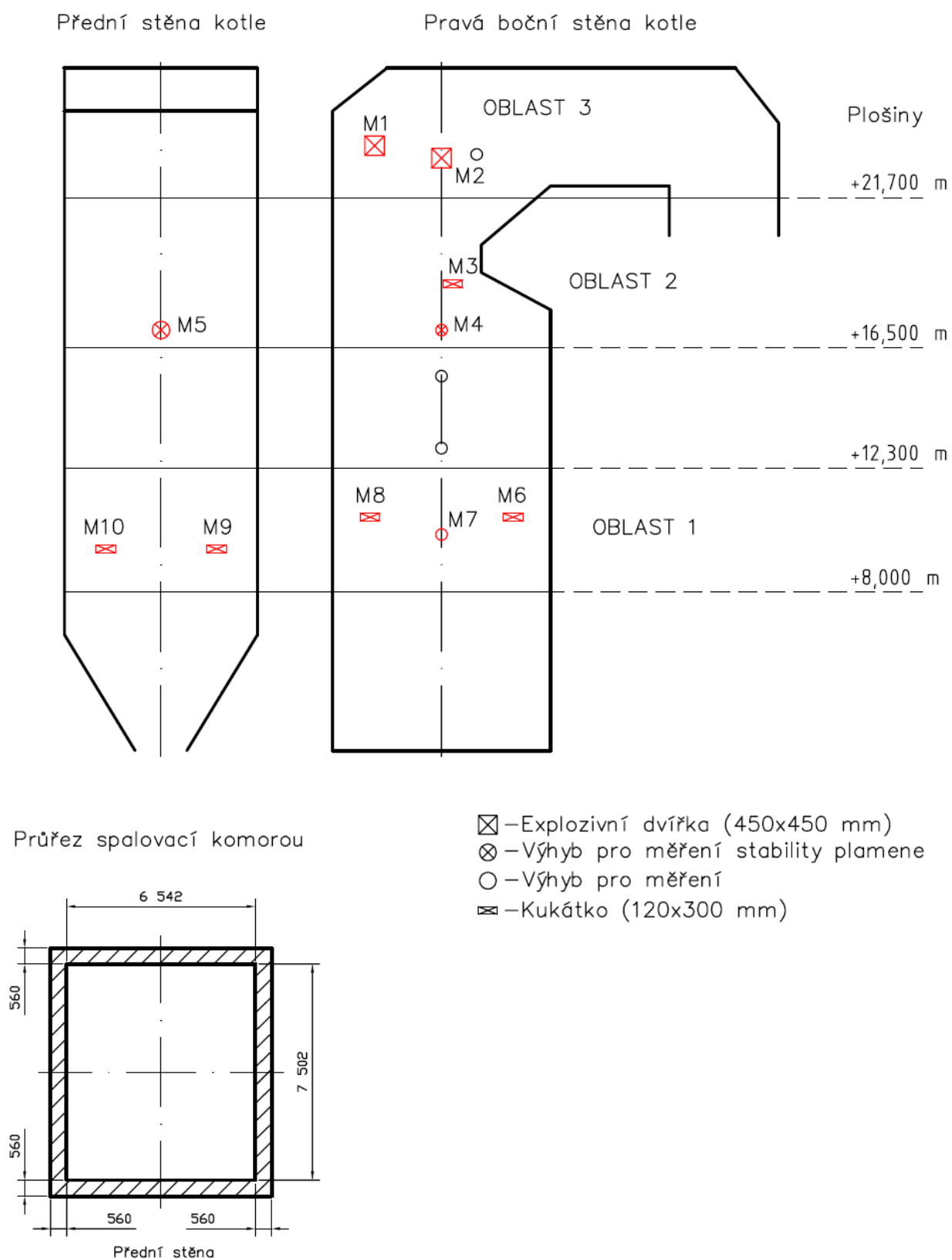
5 – chlazená sonda, 6 – termočlánek, 7 – keramická dvouplášťová hlavice

Obr. 3 Schéma vodou chlazeného prosávacího pyrometru

Měření teplot spalin bylo provedeno ve SK na výškových úrovních plošin nacházejících se kolem kotle a to + 8,00 m, + 16,50 m a + 21,70 m. Tyto úrovně zcela neodpovídají výškové úrovni měřících bodů. Pro lepší názornost jsou jednotlivé měřící přímky a body znázorněny v **Tab. 1** a na jednotlivých schématech měřících rovin. Měřící místa jsou dále zobrazeny na **Obr. 4**.

Tab. 1 Přehled měřících přímek a jejich umístění na kotli

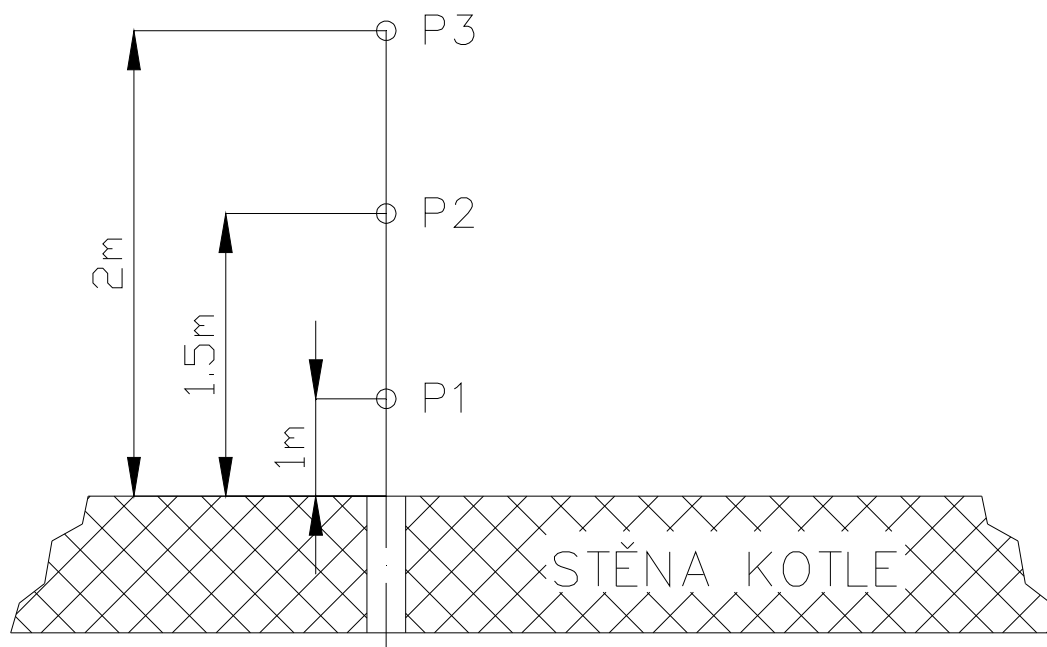
Výšková úroveň plošiny [m]	Označení měřících přímek	Výšková úroveň měřících bodů [m]	Popis
+ 21,70	M - 1R	+ 23,18	otvor na pravé straně blíže k čelu kotle
	M - 1L	+ 23,18	otvor na levé straně blíže k čelu kotle
	M - 2R	+ 23,50	otvor na pravé straně dále od čela kotle
	M - 2L	+ 23,50	otvor na levé straně dále od čela kotle
+ 16,50	M - 4R	+ 16,90	otvor na pravé straně
	M - 4L	+ 16,90	otvor na levé straně
	M - 5S	+ 16,70	čelo kotle střed
+ 8,00	M - 6R	+ 10,30	otvor na pravé straně dále od čela kotle
	M - 6L	+ 10,30	otvor na pravé straně dále od čela kotle
	M - 7R	+ 9,70	otvor na pravé straně v ose kotle
	M - 7L	+ 9,70	otvor na levé straně v ose kotle
	M - 8R	+ 10,30	otvor na pravé straně blíže k čelu kotle
	M - 8L	+ 10,30	otvor na levé straně blíže k čelu kotle
	M - 9S	+ 9,50	čelo kotle pravá strana
	M - 10S	+ 9,50	čelo kotle levá strana



Obr. 4 Schéma kotle s vyznačenými měřicími místy

4.1.1 Výsledky měření teplot

Výsledky naměřených teplot jsou uvedeny v následujících tabulkách vždy s označením měřících míst a měřících bodů. Schéma měřících bodů je uvedeno na **Obr. 5**.



Obr. 5 Schéma měřících bodů

Tab. 2 Tabulka naměřených hodnot pro výkon 100%

Měřící přímka		Měřící bod		
		P1	P2	P3
		[°C]		
Úroveň +9,50m	M-7R	1120	1210	1220
	M-9S	920	920	960
	M-10S	860	910	1015
	M-7L	1320	1340	1330
Úroveň +16,50m	M-4R	1060	1075	1080
	M-5S	1140	1150	1170
	M-4L	1030	1030	1040
Úroveň +21,70m	M-2R	710	720	720
	M-1R	790	770	790
	M-2L	670	690	660
	M-1L	720	730	740

Tab. 3 Tabulka naměřených hodnot pro výkon 80%

Měřicí přímka		Měřicí bod		
		P1	P2	P3
		[°C]		
Úroveň +9,50m	M-7R	1285	1310	1330
	M-9S	965	970	970
	M-10S	510	500	560
	M-7L	1195	1190	1200
Úroveň +16,50m	M-4R	1035	1040	1045
	M-5S	1035	1035	1040
	M-4L	925	935	930
Úroveň +21,70m	M-2R	780	755	780
	M-1R	670	670	690
	M-2L	630	640	650
	M-1L	670	670	670

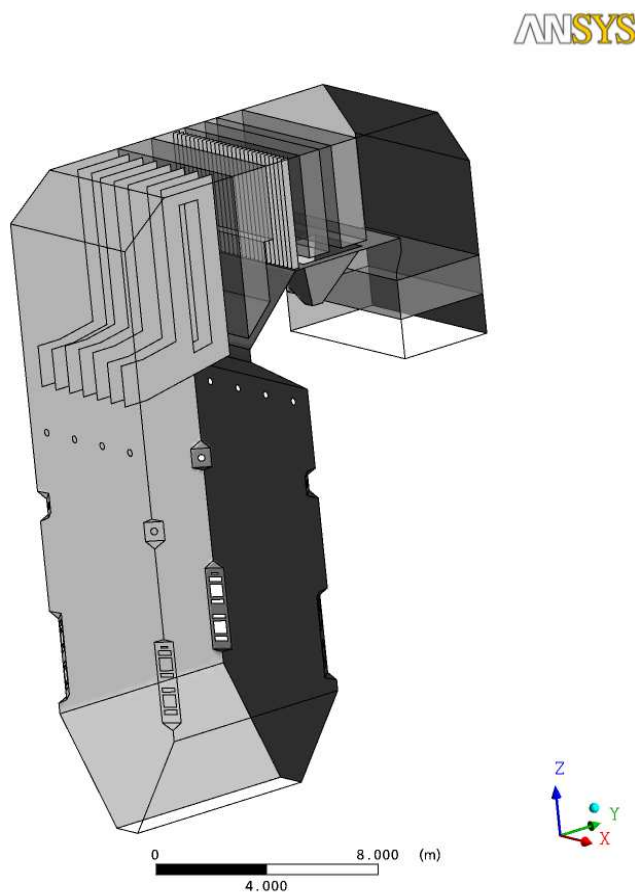
Tab. 4 Tabulka naměřených hodnot pro výkon 60%

Měřicí přímka		Měřicí bod		
		P1	P2	P3
		[°C]		
Úroveň +9,50m	M-7R	1180	1210	1260
	M-9S	990	970	1080
	M-10S	920	920	995
	M-7L	1070	1150	1120
Úroveň +16,50m	M-4R	900	910	940
	M-5S	910	980	980
	M-4L	870	935	985
Úroveň +21,70m	M-2R	700	700	730
	M-1R	630	650	640
	M-2L	670	675	680
	M-1L	650	650	670

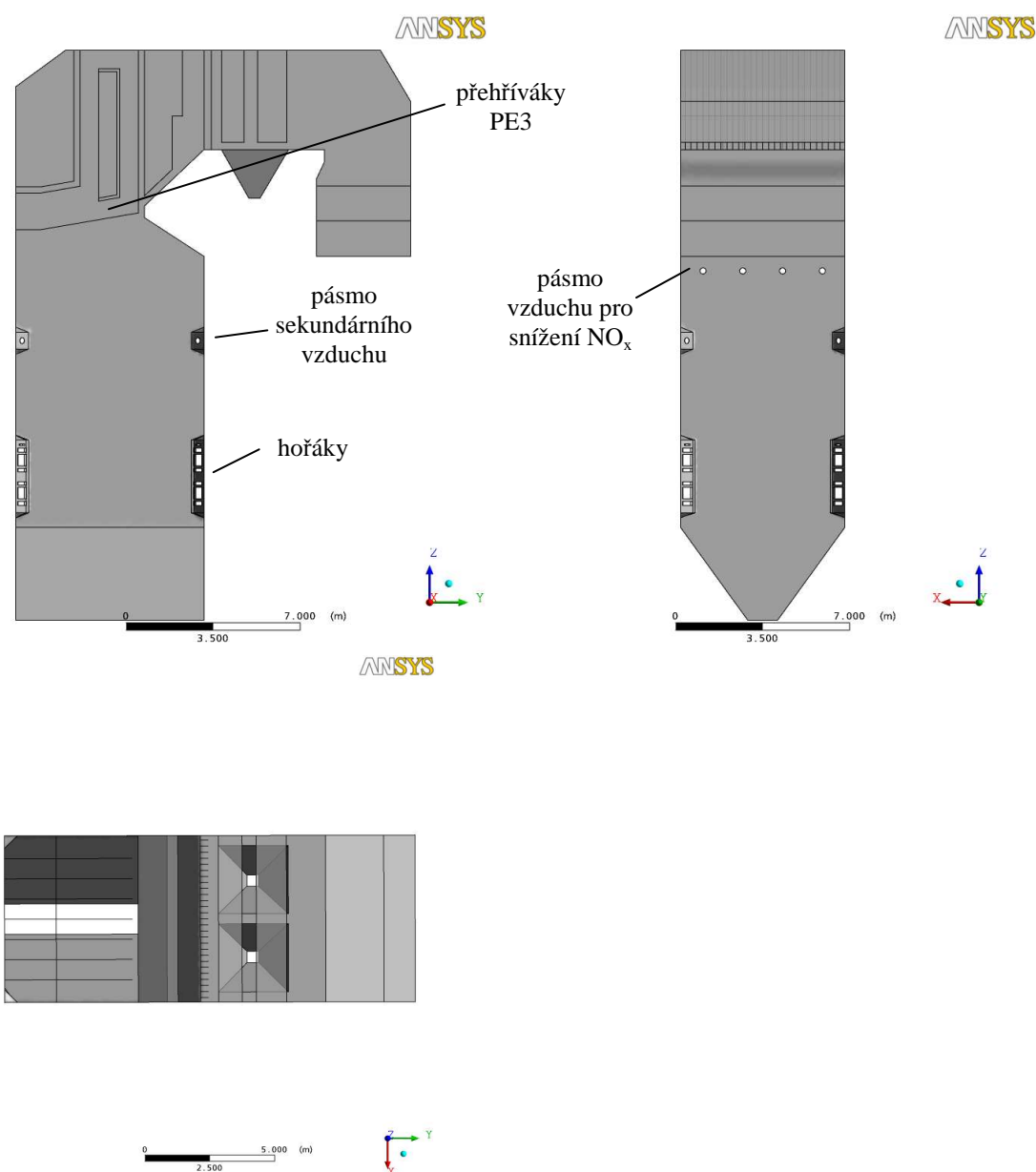
4.2 Matematické modelování průběhu teplot ve SK kotle

Pro vytvoření matematické simulace průběhu teplot ve SK kotle v programu ANSYS/CFX bylo vytvořeno na základě podkladů, které byly předány zadavatelem, a jedná se o parametry uhlí (základní elementární analýzy, granulometrie, apod.), toky uhlí a vzduchu (ze záznamu provozu kotle, nastavení všech médií pro jednotlivé výkonové hladiny, apod.). Modelování bylo provedeno pro tři základní hladiny výkonu 60, 80, 100%. Podrobný popis matematické simulace není předmětem této diplomové práce, a tak budou zmíněny pouze výsledky teplotních polí.

Výpočetní oblast byla vytvořena podle výkresové dokumentace obdržené od zadavatele. Řešená oblast obsahovala spalovací komoru se všemi teplosměnnými plochami. Výpočtová oblast byla ukončena v druhém tahu za výměníkem EKO. Geometrie neobsahovala práškovody ani detaily jednotlivých hořáků. Šotový přehřívák byl vytvořen jako tenká deska. Ostatní výměníky byly definovány jako objemy s odvodem tepla.

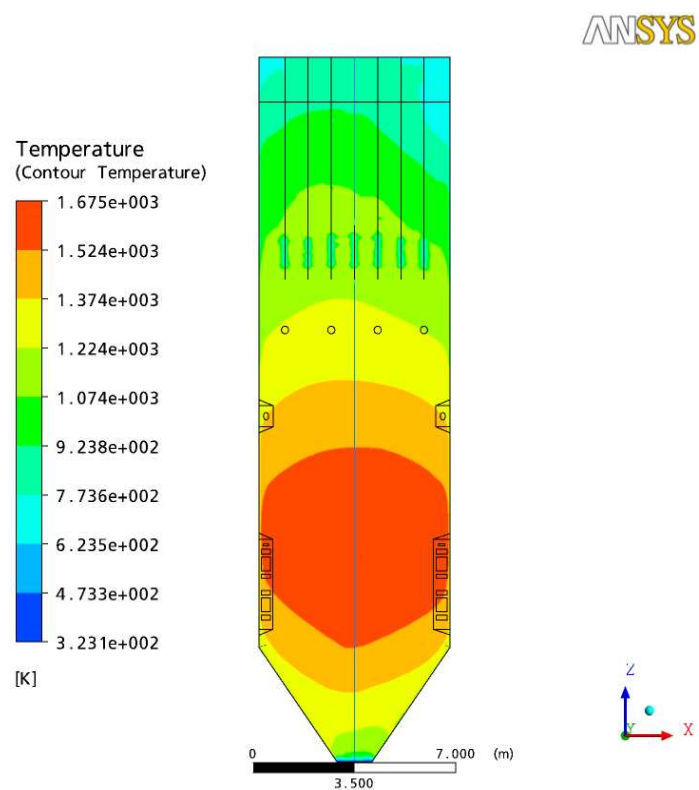


Obr. 6 Pohled na vytvořený 3D parametrický model kotle

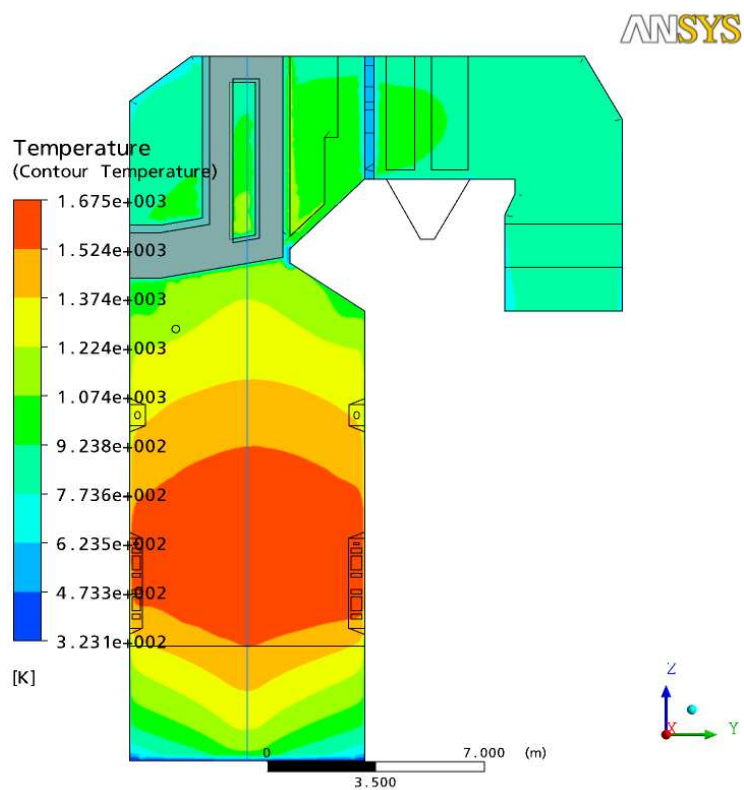


Obr. 7 Základní pohledy na vytvořený 3D parametrický model kotle

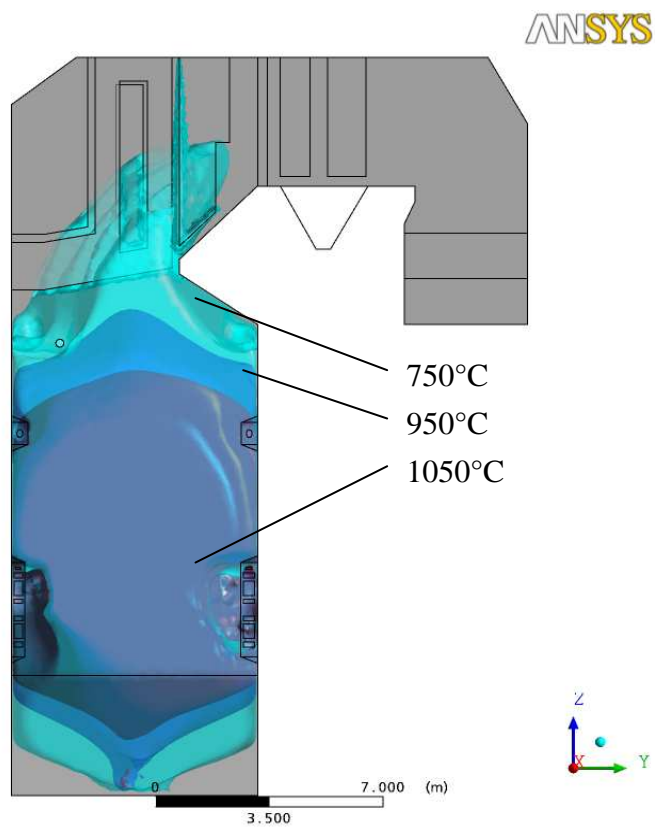
Na následujících obrázcích (**Obr. 10 až Obr. 19**) jsou uvedeny výsledky matematických simulací pro jednotlivé výkonové hladiny s vyznačením hodnot teplot ve SK.



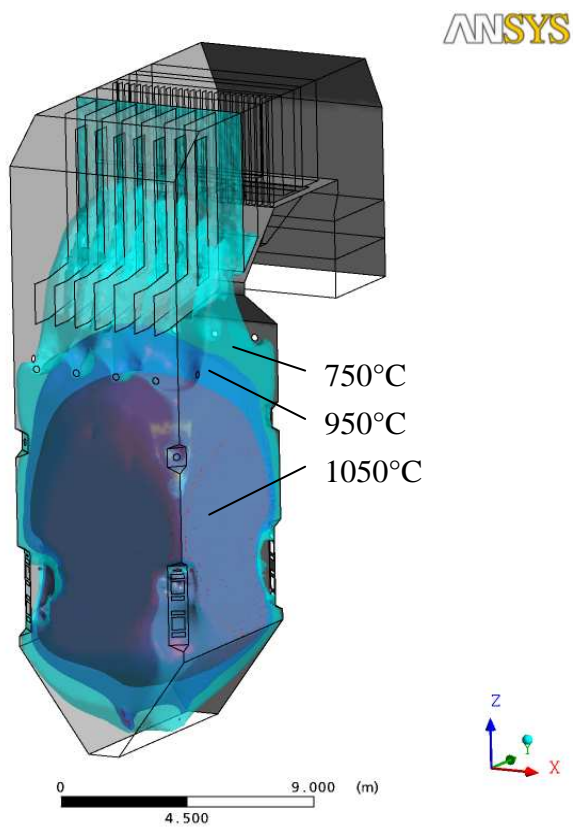
Obr. 8 Zobrazení kontur teploty ve středu SK, pohled zepředu, výkon 100%



Obr. 9 Zobrazení kontur teploty ve středu SK, pohled zprava, výkon 100%

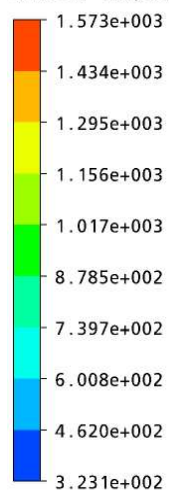


Obr. 10 Zobrazení teplotního okna, pohled zprava, výkon 100%

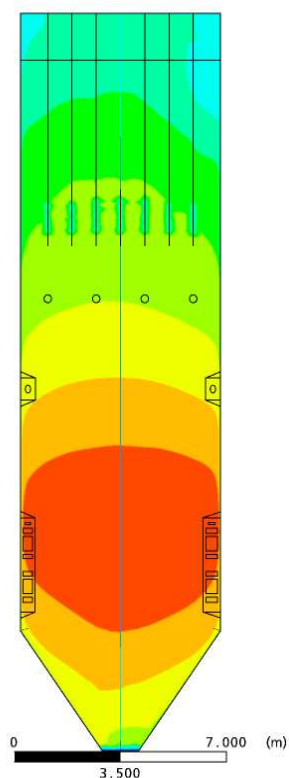


Obr. 11 Zobrazení teplotního okna, izometrický pohled, výkon 100%

Temperature
(Contour Temperature)

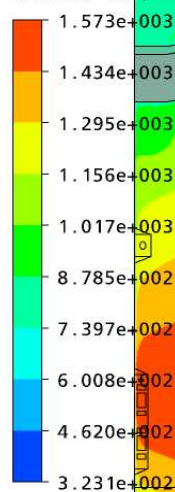


[K]

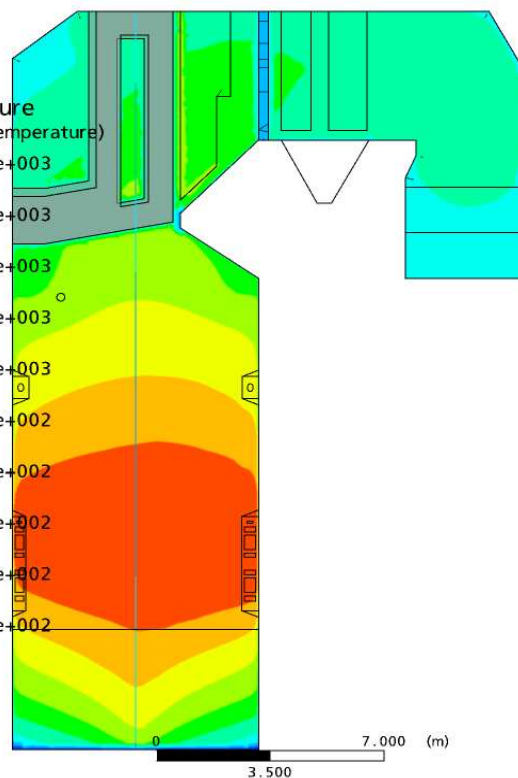


Obr. 12 Zobrazení kontur teploty ve středu SK, pohled zepředu, výkon 80%

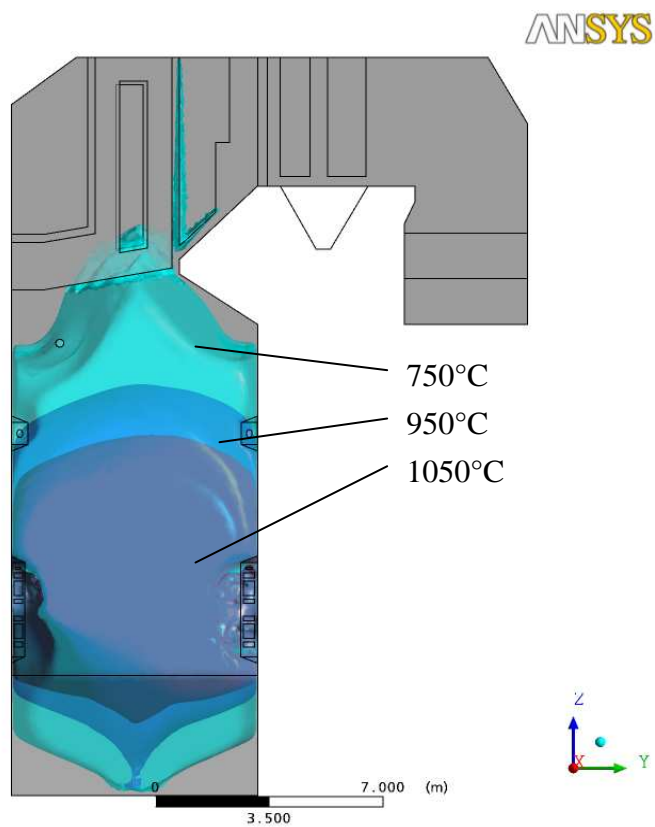
Temperature
(Contour Temperature)



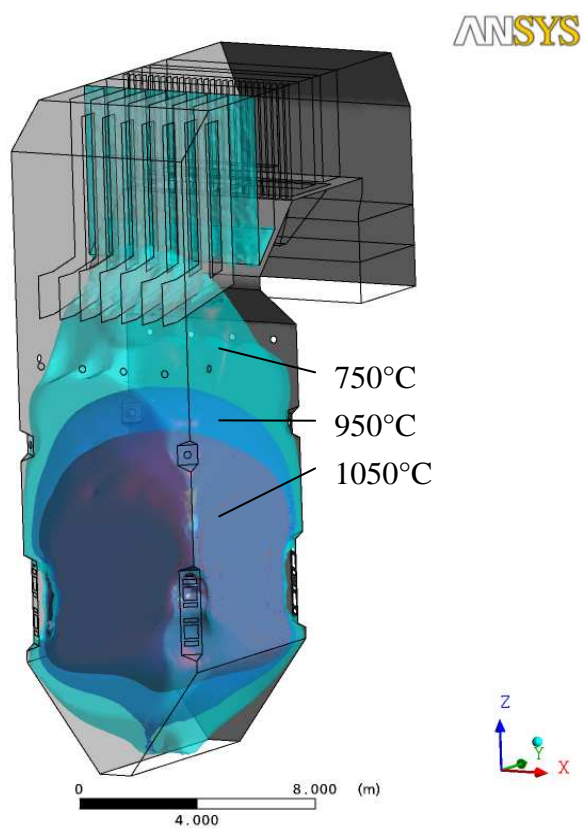
[K]



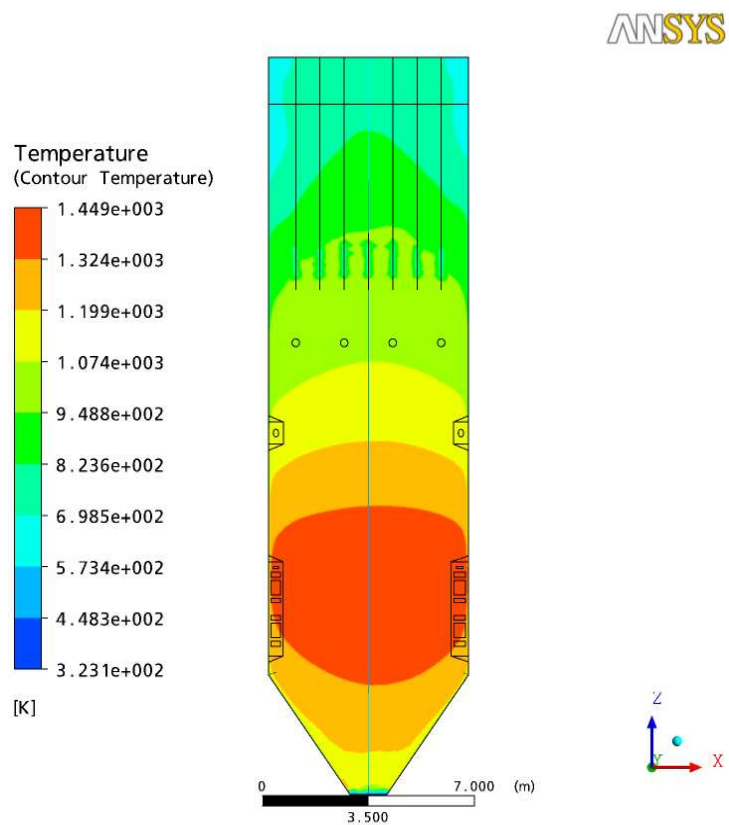
Obr. 13 Zobrazení kontur teploty ve středu SK, pohled zprava, výkon 80%



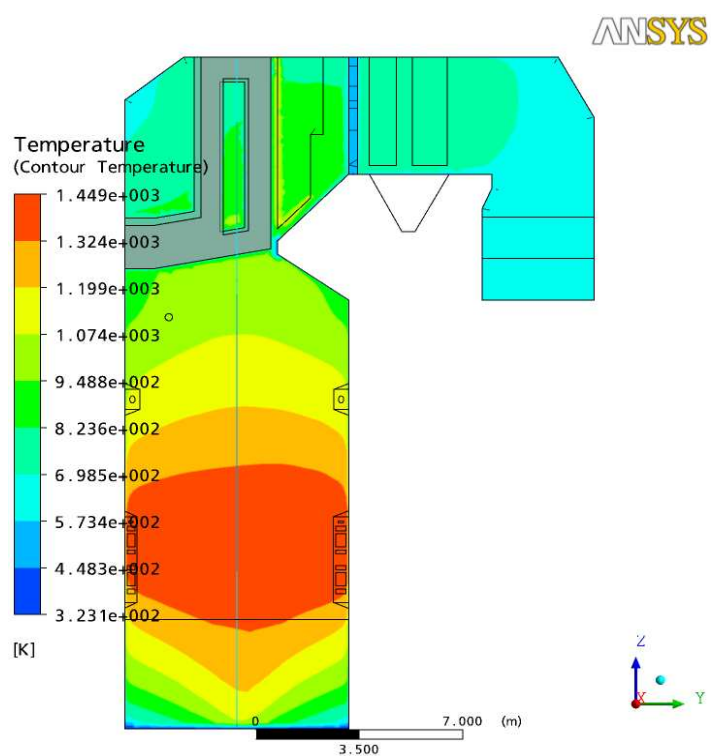
Obr. 14 Zobrazení teplotního okna, pohled zprava, výkon 80%



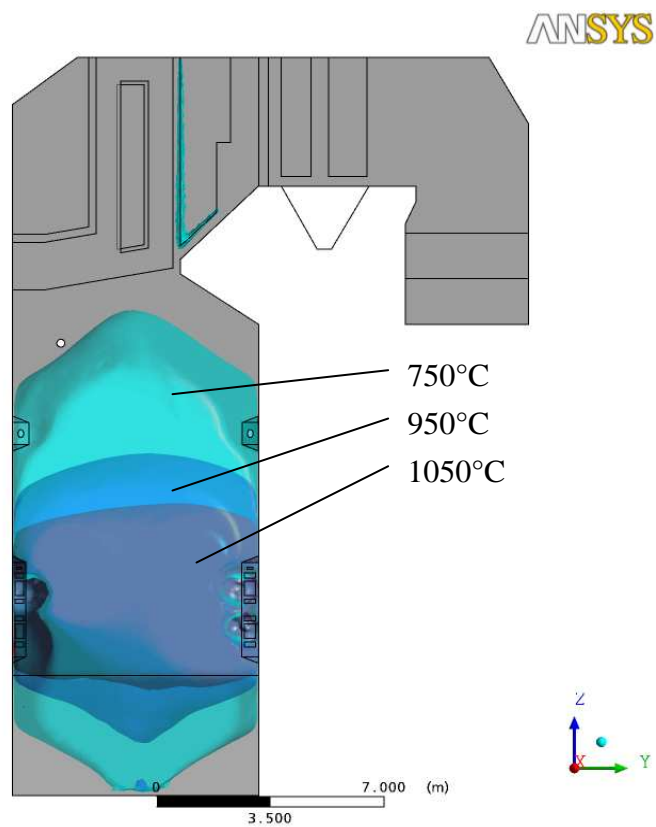
Obr. 15 Zobrazení teplotního okna, izometrický pohled, výkon 80%



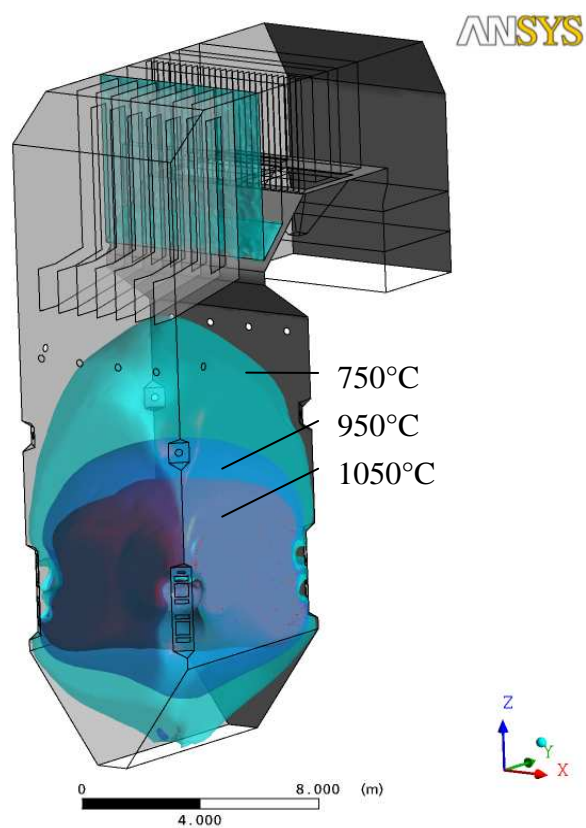
Obr. 16 Zobrazení kontur teploty ve středu SK, pohled zepředu, výkon 80%



Obr. 17 Zobrazení kontur teploty ve středu SK, pohled zprava, výkon 80%



Obr. 18 Zobrazení teplotního okna, pohled zprava, výkon 60%



Obr. 19 Zobrazení teplotního okna, izometrický pohled, výkon 60%

4.3 Určení prostupů do SK kotle

Na základě měření teplot ve SK pomocí prosávacího pyrometru a provedené matematické simulace budou určeny místa vhodná pro rozstřík roztoku močoviny. Ideální teplotní okno pro správnou funkci technologie SNCR je v rozmezí od 850°C do 1050°C.

Pro **výkon 100%** se ideální teplotní okno podle modelování nachází v rozmezí od pásma sekundárního vzduchu (ca +14,00 m) až po přehříváky PE3 (ca +21,30 m). Z výsledku provedeného měření se nacházejí teploty vhodné pro redukci NO_x v otvorech na čele kotle na úrovni +9,50 m a levé straně kotle na úrovni +16,50 m.

Pro **výkon 80%** je teplotní okno podle modelování ohraničeno pásmem sekundárního vzduchu (ca +14,00 m), po pásmo vzduchu pro snížení NO_x (ca +17,25 m). Z naměřených hodnot se otvory vhodné pro redukci nacházejí na úrovni +16,50m.

Pro **výkon 60%** je teplotní okno podle modelování ohraničeno práškovými hořáky (ca +12,3 m), po pásmo sekundárního vzduchu (ca +14,00 m). Z naměřených hodnot se otvory vhodné pro redukci nacházejí na úrovni +16,50m.

Prostupy by se tedy měly nacházet ve výškových úrovních :

100% - +17,00 m

80% - +16,50 m

60% - +13,00 m

Vzhledem k nemožnosti provedení prostupů v uvedených výškových hladinách z důvodů překážek (potrubí vzduchu, nosné profily kotle, vedení médií, apod.), které brání správné manipulaci se vstřikovací tryskou, byly určeny místa vhodná, jak z hlediska výroby prostupů, tak i následné manipulace se vstřikovací tryskou (vysunutí a zasunutí trysky do SK). Výsledné umístění prostupů je uvedeno v **Tab. 5** a zobrazeno v **Příloze 2**.

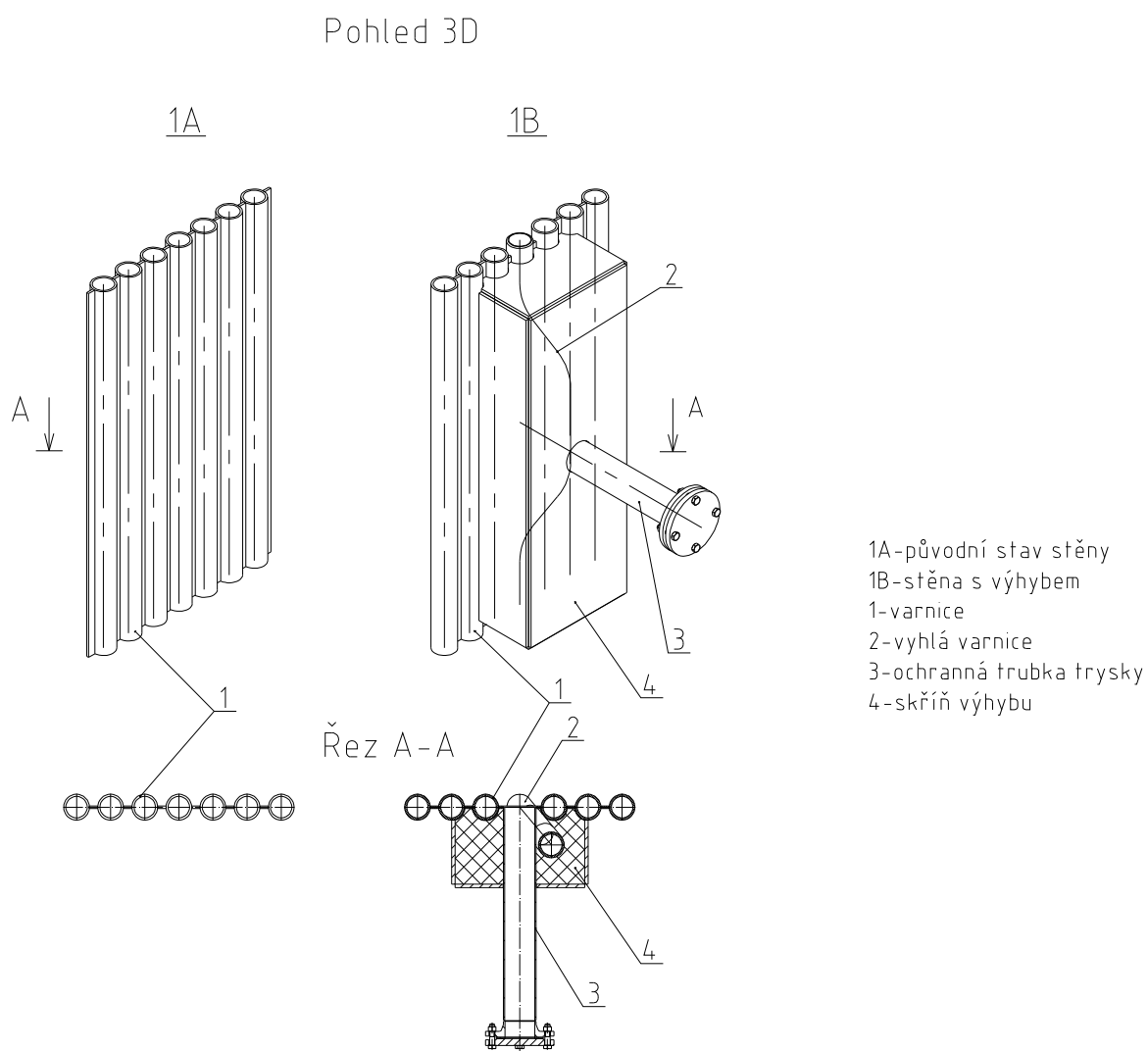
Prostupy 11 – 16 jsou z důvodu kolektoru přehříváku PE3 umístěny na úrovni + 21,80 m a osa rozstříku je skloněna o 45° směrem dolů. Prostupy 7 – 8 vzhledem k potrubí sekundárního vzduchu nelze provést prostupy kolmo k ose kotle, a je zapotřebí prostupy zhotovit tak, že osa rozstříku svírá se stěnou SK úhel 80°.

Tab. 5 Přehled navržených prostupů a umístění na kotli

Označení navržených prostupů	Výšková úroveň navržených prostupů [m]	Popis
1	+ 17,50	otvor na pravé boční stěně
2	+ 16,50	otvor na pravé boční stěně
3	+ 16,50	otvor na levé boční stěně
4	+ 17,50	otvor na levé boční stěně
5	+ 15,30	otvor na čelní straně kotle
6	+ 15,30	otvor na čelní straně kotle
7	+ 17,70	otvor na čelní straně kotle
8	+ 17,70	otvor na čelní straně kotle
9	+ 17,70	otvor na čelní straně kotle
10	+ 17,70	otvor na čelní straně kotle
11	+ 21,80	otvor na čelní straně kotle
12	+ 21,80	otvor na čelní straně kotle
13	+ 21,80	otvor na čelní straně kotle
14	+ 21,80	otvor na čelní straně kotle
15	+ 21,80	otvor na čelní straně kotle
16	+ 21,80	otvor na čelní straně kotle

4.3.1 Technické řešení prostupů

Z důvodů nedostačujícího prostoru mezi okraji jednotlivých trubek výparníku, je třeba stěny kotle upravit tak, aby mezi ně bylo možné umístit vstřikovací trysku s ochrannou trubicí (viz. **Příloha č.3**). Řešení tohoto problému spočívá ve vyhnutí jedné trubky výparníku a vytvoření místa pro umístění ochranné trubky. Na **Obr. 20** je uvedeno technické řešení výhybů, kde můžeme vidět původní stav stěny kotle (bez izolace) a stav stěny s provedeným výhybem.



Obr. 20 Technické řešení výhybů trubek výparníku pro umístění vstřikovacích trysek

4.3.2 Vstřikovací tryska, popis funkce

Vstřikovací tryska je konstruována jako dvousložková, kde pracovní média tvoří vzduch a směs (roztok močoviny s demivodou). Technologické schéma vstřikovací trysky je uvedeno v **Příloze č.3**. Vstřikovací tryska zajišťuje rozstřík směsi ve SK kotle a skládá se z následujících částí :

- ochranná trubka
- upínací příruba
- směšovací část
- hrot trysky

Ochranná trubka je tvořena trubkou o průměru 76,1x2,6 s přivařenou přírubou DN65/PN6 na konci. Zajišťuje vedení a ochranu vstřikovací trysky před mechanických poškozením vnějšími vlivy.

Upínací příruba je hrdlová příruba DN65/PN6 přichycená čtyřmi šrouby k přírubě ochranné trubky s bajonetovým zámkem na konci hrdla. Upínací příruba zajišťuje uchycení vstřikovací trysky pomocí bajonetového zámku, kterým je možné nastavit i hloubku zasunutí trysky do SK kotle.

Do směšovací části jsou přivedeny pracovní média tlakový vzduch a směs (roztok močoviny s demivodou). Ve směšovací části probíhá smísení těchto médií rozprášením směsi v proudu tlakového vzduchu a výsledná vstřikovací směs je dopravena na hrot trysky.

Hrot trysky je pomocí závitů upevněn na konci vnitřní trubky, která vede vstřikovací směs. Souběžně s vnitřní trubkou je vedena trubka vnější zajišťující ochranu vnitřní trubce. Ve vytvořeném mezikruží proudí tlakový vzduch sloužící k částečnému chlazení trysky. Pomocí hrotu trysky je vstřikovací směs rozprášena do SK kotle a pokrývá tak část SK. Pro lepší pokrytí průřezu SK kotle v současné době používá firma ORGREZ, a.s. dva základní typy hrotů trysek, a to:

- a) s kuželovým rozstříkem
- b) s plošným rozstříkem

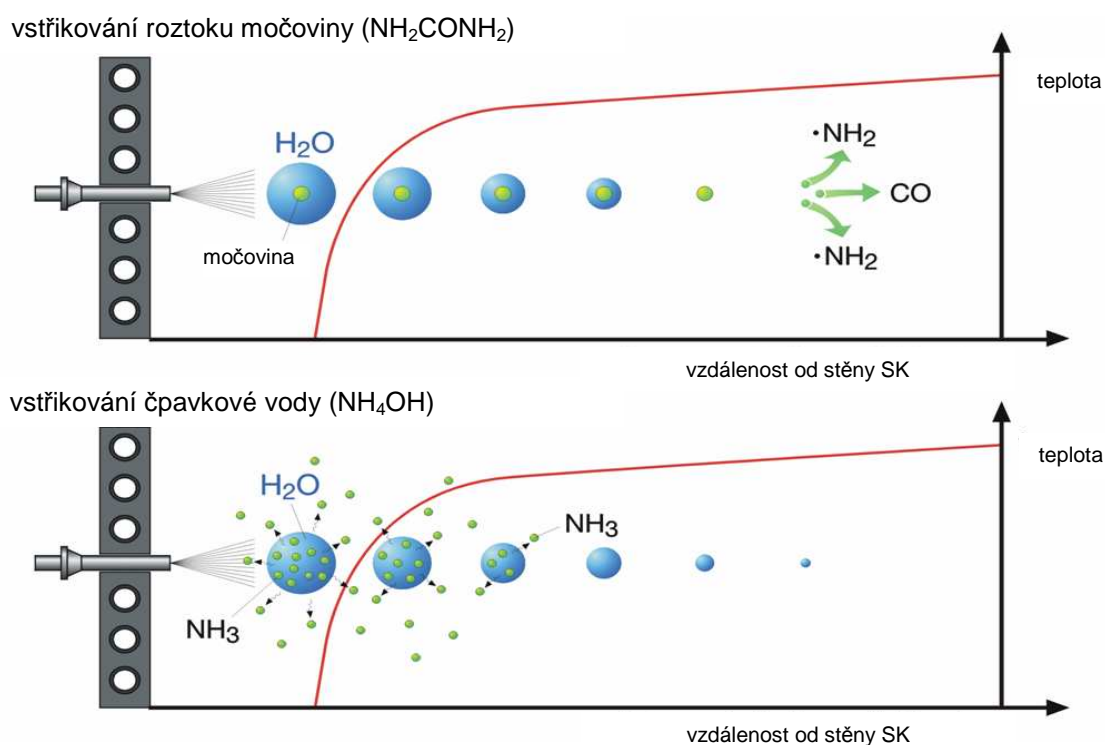
Používané hroty trysek s plošným rozstříkem se liší od hrotu s kuželovým rozstříkem zvětšenou plochou pokrytí a množstvím přivedené směsi. Běžně jsou instalovány hroty s kuželovým rozstříkem a v případě potřeby zvýšit plochu pokrytí volí se hroty s plošným rozstříkem.

5 Volba a potřebné množství aditiva

Volba aditiva závisí na požadavku provozovatele zařízení, případně na výsledcích měření teploty. Technologii je vhodné provozovat v teplotním oknu 850 – 1050 °C.

Pokud se toto okno nachází v oblasti teplosměnných ploch a vstřikovací trysky technologie by byly umístěny v jejich blízkosti, může dojít k jejich poškození. Pak je nutno pak jako aditivum využít čpavkovou vodu, která nepoškodí vzhledem ke svým vlastnostem teplosměnné plochy. V případě, že teplotní okno je ve volném prostoru je možno jako aditivum zvolit roztok čpavkové vody nebo roztok močoviny. Na **Obr. 21** je schématicky naznačen princip odpařování jednotlivých aditiv ve SK kotle.

Z návrhu prostupu do SK pro vstřikovací trysky by bylo vhodné použít jako aditivum čpavkovou vodu, ale vzhledem k rozhodnutí provozovatele bude použito jako aditivum roztok močoviny o koncentraci 40 % obj.



Obr. 21 Princip volby aditiva [1]

5.1 Výpočet minimální potřeby roztoku močoviny

Pro výpočet minimální spotřeby roztoku močoviny pro požadovaný stupeň snížení NO_x ve spalínách je potřeba specifikovat vstupní parametry pro výpočet. Tyto parametry jsou určeny provozním měřením kotle a zkušenostmi firmy ORGREZ a.s. s provozem technologie SNCR.

Základní parametry jsou:

- údaje o složení a množství spalín kotle pro max. výkon kotle
- stechiometrický přebytek aditiva
- stupeň redukce

Složení a množství spalín (viz. **Tab. 6**) je určeno pro max. výkon kotle (135 t.h^{-1}), neboť je předpokládáno, že při max. výkonu kotle bude množství NO_x ve spalínách nejvyšší a tím i spotřeba aditiva bude maximální.

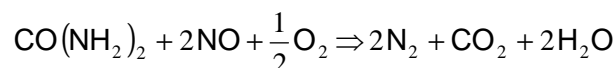
Stechiometrický přebytek aditiva je nejdůležitějším parametrem, který nejvíce může ovlivnit výpočet. Po provedení mnohých simulací je zvolen stechiometrický přebytek aditiva $\alpha = 2,8$.

Stupeň redukce je určen požadavkem provozovatele kotle na hodnotu výstupních emisí NO_x . Budoucí legislativa nařizuje provozovatelům kotlů o středním výkonu plnit limit NO_x na výstupu z kotle na hodnotě 200 mg.m_N^{-3} . Tato hodnota je pro výpočet závazná.

Tab. 6 Údaje o množství a složení spalín

Název	Značení	Hodnota	Jednotky
Množství vlhkých spalín	$V_{\text{SP,v}}$	206 666	$\text{m}_N^3.\text{h}^{-1}$
Množství suchých spalín	$V_{\text{SP,s}}$	186 000	$\text{m}_N^3.\text{h}^{-1}$
Obsah vody ve spalínách	w	10,00	%
Obsah kyslíku referenční	$\text{O}_{2,\text{ref}}$	6,00	%
Obsah kyslíku ve spalínách skut.	$\text{O}_{2,\text{skut}}$	6,00	%
Stávající obsah NO_x ve spalínách	$\text{NO}_{x,1}$	375,00	mg.m_N^{-3} , 6% O_2
Požadovaný obsah NO_x ve spalínách	$\text{NO}_{x,2}$	200,00	mg.m_N^{-3} , 6% O_2

Pro výpočet množství spotřeby aditiva vycházíme ze zjednodušené rovnice reakce pro redukci v následujícím tvaru:



Pro výpočet je potřeba stanovit hmotnosti močoviny $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ a 2NO z uvedené chemické rovnice, které jsou spolu s dalšími hodnotami potřebnými k výpočtu uvedeny v **Tab. 7**.

Tab. 7 Hmotnosti složek v rovnici

Název	Značka	Jednotky	Hodnota
Hmotnost $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	$M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}$	kg.kmol^{-1}	60,06
Hmotnost 2NO	$M_{2\text{NO}}$	kg.kmol^{-1}	60,01
Koncentrace roztoku močoviny	c	%	45,00
Stechiometrický přebytek aditiva	α	-	56,03
Hustota vodného roztoku močoviny	ρ_r	kg.m^{-3}	1122

Výpočet stupně redukce pro zadané parametry, ΔNO_x :

$$\Delta\text{NO}_x = \text{NO}_{x,1} - \text{NO}_{x,2} = 375 - 200 = \underline{\underline{175 \text{ mg.m}_N^{-3}}}$$

Výpočet skutečného množství NO ve spalinách, ΔNO_{sk} :

$$\Delta\text{NO}_{sk} = \Delta\text{NO}_x \cdot \frac{M_{\text{NO}}}{M_{\text{NO}_2}} = 175 \cdot \frac{30,01}{46,01} = \underline{\underline{114,14 \text{ mg.m}_N^{-3}}}$$

Výpočet stechiometrické spotřeby roztoku močoviny, Q_m :

$$Q_m = \frac{\Delta\text{NO}_{sk} \cdot M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}}{M_{2\text{NO}}} \cdot V_{sp,s} = \frac{114,14}{60,01} \cdot 60,06 \cdot 206666 = \underline{\underline{21,25 \text{ kg.h}^{-1}}}$$

Výpočet skutečné spotřeby roztoku močoviny, $Q_{m,sk}$:

$$Q_{m,sk} = Q_m \cdot \alpha = 21,25 \cdot 2,8 = \underline{\underline{59,49 \text{ kg.h}^{-1}}}$$

Výpočet skutečné spotřeby roztoku aditiva, $Q_{r,sk}$:

$$Q_{r,sk} = \frac{Q_{m,sk}}{c} \cdot 100 = \frac{59,49}{45} \cdot 100 = \underline{\underline{132,19 \text{ kg.h}^{-1}}} \Rightarrow \frac{Q_{r,sk}}{\rho_r} \cdot 1000 = \frac{132,19}{1122} \cdot 1000 = \underline{\underline{117,8 \text{ l.h}^{-1}}}$$

Z výpočtů tedy vyplývá spotřeba roztoku močoviny pro zadanou redukci NO_x o 175 mg.m_N⁻³ je 117,8 l.h⁻¹. Na kotli bude instalováno pro jednotlivé vstřikovací úrovně vždy 6 ks vstřikovacích trysek, mezi které je bude toto množství spolu s demivodou rozděleno. Tato hodnota slouží pro počáteční nastavení technologie SNCR během vlastního provozu může být snížena nebo zvýšena dle aktuálního stupně redukce emisí NO_x.

6 Technologie SNCR, jednotlivé části technologie

V následujících kapitolách jsou popsány základní prvky technologie SNCR instalované na kotli, jejich princip a funkce. Níže uvedený popis prvků vychází z již uskutečněné realizace provedené firmou ORGREZ, a.s. V principu je technologie SNCR je složena ze dvou základních okruhů:

- přívod, skladování a doprava roztoku močoviny k míchacímu a měřicímu modulu
- míchací měřicí modul, potrubní trasy ke vstřikovacím tryškám, vstřikovací trysky

Doprava roztoku močoviny je realizována v tomto případě pomocí IBC kontejneru, ve kterém se dopraví roztok močoviny k zásobní nádrži. Zde se pomocí čerpadlového modulu přečerpá do zásobní nádrže. Skladování roztoku močoviny probíhá v zásobní nádrži, odkud je pomocí čerpadel dopraven potrubím k míchacímu a měřicímu modulu.

Míchací a měřicí modul zajišťuje smísení směsi z roztoku močoviny a demivody, a pomocí potrubních tras je směs dopravena k jednotlivým vstřikovacím tryškám.

Všechna zařízení a jednotlivé členy technologie SNCR jsou vybaveny potřebnými armaturami a měřicími a regulačními členy. Seznam použitých měřicích členů je uveden v **Příloze č. 6**.

Během práce s technologií je potřeba dodržovat veškeré platné předpisy pro manipulaci a ovládání jednotlivých prvků, práce v ochranných brýlích, rukavice, apod. Pokud dojde k zasažení roztokem močoviny je potřeba se řídit pokyny uvedenými v bezpečnostním listu roztoku močoviny, viz. **Příloha č. 7**.

6.1 Zásobní nádrž technologie SNCR

Zásobní nádrž má vnitřní objem 6m^3 , je vyrobena z PE, má dvojité stěny a je osazena snímači a zařízením, které slouží pro bezpečné skladování roztoku. Zásobní nádrž je umístěna v bezprostřední blízkosti kotelný kotle, neboť uvnitř kotelný nejsou prostory vhodné umístění, jenž by zajistily dostatečný manipulační a zastavěný prostor nádrže. Z tohoto důvodu je zásobní nádrž umístěna vně kotelný. Nádrž je provedena jako dvouplošťová (bez potřeby záchytné vany o objemu nádrže), a je projektována ve venkovním provedení s izolací a vytápěním. Technologické schéma zásobní nádrže je uvedeno v **Příloze č. 4**.

Zásobní nádrž je osazena:

- 1) Snímačem vlhkosti LSA + 2.4, ten slouží k signalizaci netěsnosti nitřního pláště a průniků roztoku močoviny do mezistěnového prostoru.
- 2) Snímačem hladiny LSA ++ 2.1, ten slouží jako bezpečnostní pojistka proti přetečení zásobní nádrže a zajišťuje vypnutí přečerpávacího čerpadla.
- 3) Snímačem hladiny LISA +- 2.3, ten slouží pro plynulé měření hladiny v zásobní nádrži.
- 4) Snímačem teploty TISA – 2.2, ten slouží pro měření teploty roztoku v zásobní nádrži.
- 5) Snímačem tlaku PI – 2.5, jedná se pouze o ručičkový manometr, který slouží pouze pro vizuální kontrolu tlaku roztoku močoviny za čerpadlem.



Obr. 22 Zásobní nádrž technologie SNCR

Zásobní nádrž, základní parametry:

Množství	1 ks.
Materiál	PE
Určení umístění:	vnější provedení
Jmenovitý objem:	6 m ³
Průměr (vnitřní) ca.	2000 mm
Celková výška ca.	2150 mm
Skladované médium	Roztok močoviny, 40 %-ní

Každá nádrž je vybavena příslušnými přírubami pro připojení čerpadel, cirkulačního potrubí a vybavení MaR.

Vybavení nádrže:

- všechny potřebné hrdla pro připojení přístrojů a potrubí
- 1 kontrolní průlez
- zavzdušňovací a odvzdušňovací nátrubek
- měření výšky hladiny
- měření teploty regentu
- pojistka proti přeplnění dle příslušných norem
- okružní vedení

Záchytná vana:

Množství	1 ks.
Materiál	PE
Určení umístění:	vnější provedení
Jmenovitý objem:	6 m ³
Průměr (vnitřní) ca.	2350 mm
Celková výška ca.	1740 mm
Skladované médium	Roztok močoviny, 40 %-ní
Každá nádrž je vybavena přírubami pro připojení zařízení MaR.	

Vybavení záchytné vany :

- výstražný systém úniku

6.2 Oběhové čerpadlo a okružní potrubí

V zásobní nádrži jsou umístěna dvě ponorná čerpadla (jedno pracovní, druhé rezervní - 100% záloha). Ponorná čerpadla jsou určena pro dopravu roztoku močoviny ze zásobní nádrže a cirkulaci roztoku močoviny za účelem zachování konstantního tlaku v oběhu mezi nádrží a míchacím a měřicím modulem. Na sání čerpadel jsou instalovány filtry za účelem odfiltrování nečistot.

Ponorné čerpadlo dopravuje roztok močoviny do okružního potrubí, ve kterém je přes tlakový ventil RV2.1 vracena část přebytečného roztoku močoviny zpět do zásobní nádrže. Tím je zajištěna stálá cirkulace roztoku v zásobní nádrži a ve venkovním potrubí, a pomocí tlakového ventilu RV2.1 je v systému také udržován konstantní tlak roztoku močoviny. Uvnitř kotleny je již vedeno pouze jedno potrubí k měřicímu a míchacímu modulu. Jelikož je okružní potrubí vedeno vně kotleny musí být izolováno a vyhříváno. Vyhřívání okružního potrubí je realizováno pomocí topného kabelu vedeného kolem vnějšího průměru potrubí, a je řízeno automaticky v závislosti na teplotě roztoku uvnitř zásobní nádrže. Pokud teplota roztoku v nádrži klesne pod stanovenou mez, vyhřívání se automaticky zapne a při zahřátí roztoku zpět na stanovenou mez se vyhřívání automaticky vypne.

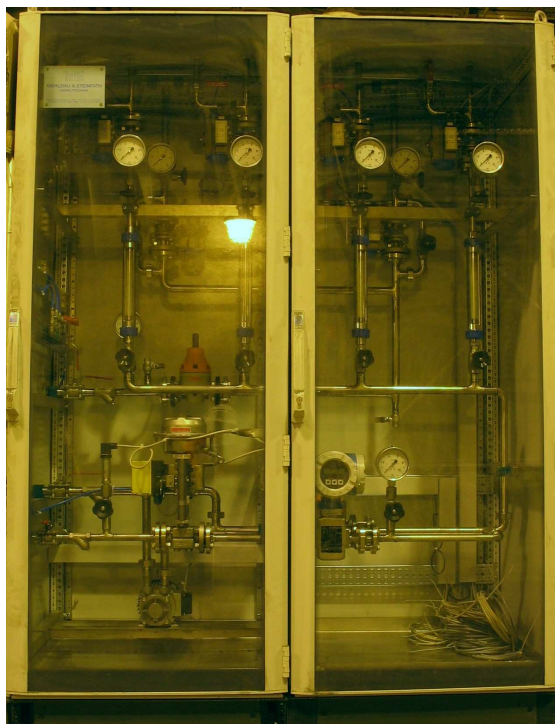
Technická data čerpadla:

Množství	2 ks.
Dopravované množství	$1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Výtlačná výška:	95 m vodního sloupce
Příkon čerpadla :	1,5 kW

6.3 Míchací a měřicí modul

Technologické schéma zásobní nádrže míchacího a měřicího modulu je uvedeno v **Příloze č. 5**. Míchací a měřicí modul sestává ze dvou kombinovaných rozváděčových skříní. Modul je vybaven potřebnými prvky, které zajišťují dopravu, rozdělení, měření a ovládání jednotlivých pracovních médií použitých v technologii. Modul je umístěný v blízkosti kotle v prostoru kotelny na výškové úrovni +12,5 m.

Míchací modul je napojen na přívod močoviny ze zásobní nádrže, přívod demivody a přívod tlakového vzduchu. Popis principu a funkce míchacího a měřicího modulu je uveden v následujících podkapitolách.



Obr. 23 Míchací a měřicí modul

Technická data:

Počet míchacích a měřících modulů	1
Délka	2 x 800 = 1600 mm
Hloubka	800 mm
Výška bez lišty	2.000 mm
Počet vstřikovacích úrovní (levelů)	2
Počet výstupů (trysek) pro parto 1	4*)
Počet výstupů (trysek) pro parto 2	4*)

*) čtyři vývody jsou mimo míchací modul rozděleny na 6 vývodů

Vybavení míchacího a měřícího modulu

1 Indukční průtokoměr pro měření průtoku roztoku močoviny

1 Průtokoměr pro měření průtoku vzduchu

1 Průtokoměr pro měření průtoku vody

4 Místní plovákové průtokoměry pro měření průtoku směsi pro jednotlivé trysky

1 Redukční ruční ventil tlakového vzduchu

1 Čerpadlo demivody

1 Redukční ruční ventil pro nastavení tlaku neionizované

1 Směšovací kus

1 Pneumaticky ovládaný ventil pro směs

2 Pneumaticky ovládané ventily pro vzduch

4 Pneumaticky ovládané ventily pro směs na přívodu do trysek (otevřeno/zavřeno)

Ruční kulové ventily

Manometry

6.3.1 Přívod roztoku močoviny

Průtok roztoku močoviny ze zásobní nádrže je regulován prostřednictvím pneumaticky ovládaného ventilu. Průtok je měřen indukčním průtokoměrem, který je umístěn za regulačním ventilem.

6.3.2 Přívod demivody

Demivoda je voda zbavená minerálních složek, které by mohly zanášet potrubní systém v modulu. Demivoda je dodatečně míchána s roztokem močoviny ze zásobní nádrže. Reguluje se tak poměr demivody a roztoku močoviny ve směsi vedené k jednotlivým tryskám. Pokud zvýšíme podíl demivody ve směsi, zvětšíme tak velikosti kapičky směsi vstřikované tryskou do SK kotle, tedy zvýšíme hloubku penetrace směsi do SK kotle.

Tlak demivody je pomocí čerpadla udržován na úroveň potřebnou ke spolehlivé tlakové regulaci (ca 6 bar).

Demivoda je přivedena z rozvodu demivody v kotelně.

6.3.3 Přívod tlakového vzduchu

Tlakový vzduch o potřebném přetlaku je prostřednictvím potrubí přiveden k měřicímu a řídicímu modulu. Tento stlačený vzduch slouží k rozprašování směsi ve SK kotle. Tlak a průtok tlakového vzduchu je regulován prostřednictvím regulačního ventilu a průtokoměru. Rozvod vzduchu je pak rozdělen do dvou větví, jedna větev pro první vstřikovací patro, druhá větev pak pro druhé vstřikovací patro. Následně je každá větev osazena pneumaticky ovládaným kulovým ventilem s obtokem (by-passem) osazeným jehlovým ručním ventilem sloužícímu k regulaci tlaku vzduchu v by-passu. By-pass slouží k vedení tlakového vzduchu v případě zastavení vstřikování v určitém patře z důvodů chlazení neaktivních trysek minimálním průtokem vzduchu.

Vně míchacího a měřicího modulu je tlakový vzduch veden do jednotlivých pater potrubím ke vstřikovacím tryskám. Tlak vzduchu při vstřikování směsi do SK kotle je ca 4 bar a tlak vzduchu sloužícího pro chlazení neaktivních trysek je ca 2 bar.

Zdroj tlakového vzduchu je možné vést z tlakové sítě umístěné v prostoru kotelny, pokud však tento rozvod nedisponuje požadovanými parametry je potřeba vytvořit pomocí kompresoru zdroj nový.

6.3.4 Vytvoření směsi

Směsí rozumíme směs roztoku močoviny a demivody přivedených do míchacího a měřícího modulu. Na základě tlakové regulace je demivoda spolu s roztokem močoviny smíchána a homogenizována ve směšovacím prvku (T-kus potrubí + koleno 90°, viz. **Příloha č. 5**). Následně je směs rozdělena mezi jednotlivé trysky. V jednotlivých větvích jsou umístěny plováčkové průtokoměry, které slouží pro vizuální kontrolu funkce jednotlivých větví. Průtok v jednotlivých větvích je nastaven pomocí ručních jehlových regulačních ventilů. Každá větev je dále osazena pneumatickým kulovým ventilem, který směřuje tok roztoku dle řídicího algoritmu na patro 1 nebo patro 2.

6.4 Řídicí skříň technologie SNCR

Řídicí skříň se nachází vedle míchacího a měřícího modulu. Veškeré pohony a analogové, popř. binární vstupy a výstupy, se v řídicí skříni regulují na základě hodnot z míchacího a měřícího modulu a zásobní nádrže.

Na předních dvířkách řídicí skříně jsou instalovány důležité ovládací a signalizační prvky zajišťující ovládání a bezpečný provoz technologie SNCR. Instalovaný řídicí systém, dále jen ŘS, se skládá z automatu SIEMENS S7 – 300 se zabudovaným ovládacím panelem, dále jen OP, na dveřích řídicí skříně, viz **Obr. 24**. K řízení a regulaci technologie SNCR (míchacího a měřící modul/ zásobní nádrže) se využívá SPS s integrovaným softwarem.

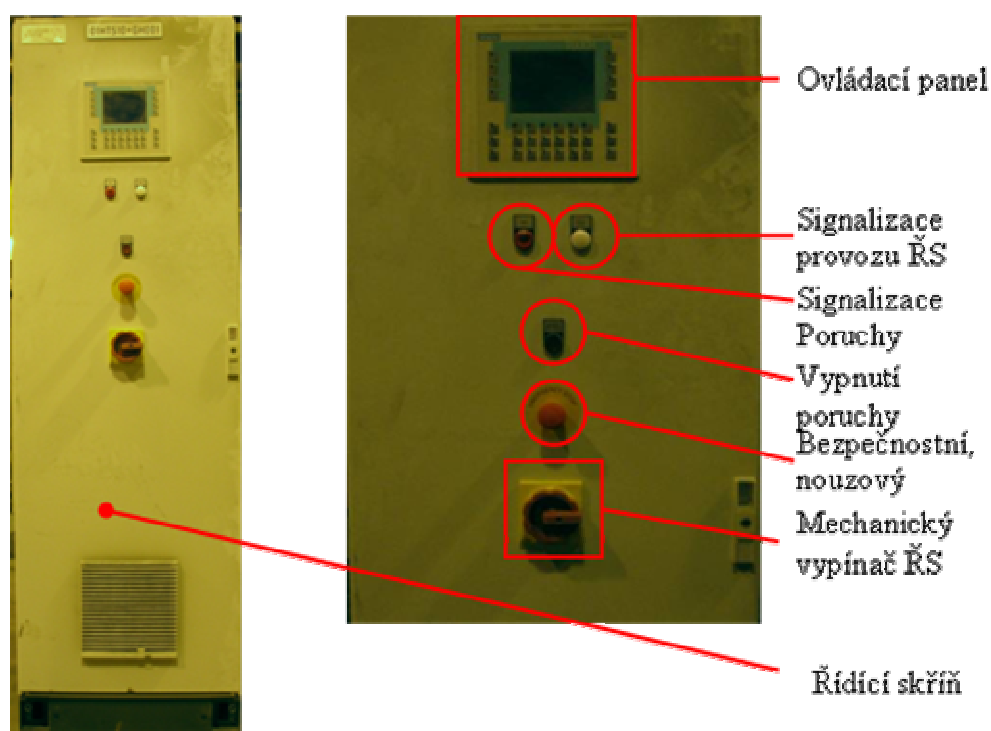
ŘS se skládá z následujících hlavních částí:

- výpočetní jednotka s pamětí CPU
- komunikační procesor pro výměnu dat s řídicí technikou CPU
- napájecí modul pro SPS
- vstupní a výstupní moduly

Ovládací panel umístěný na dveřích skříně:

- pole zobrazení a vstupní datové pole OP

CPU pracuje se softwarem uchovaném v programové paměti. Obsluha a hlídání technologie s OP je řízena programem R-S7. V případě výpadku napájecího napětí je udržení dat v programové paměti CPU (RAM) zajištěné MMC zapojené CPU.



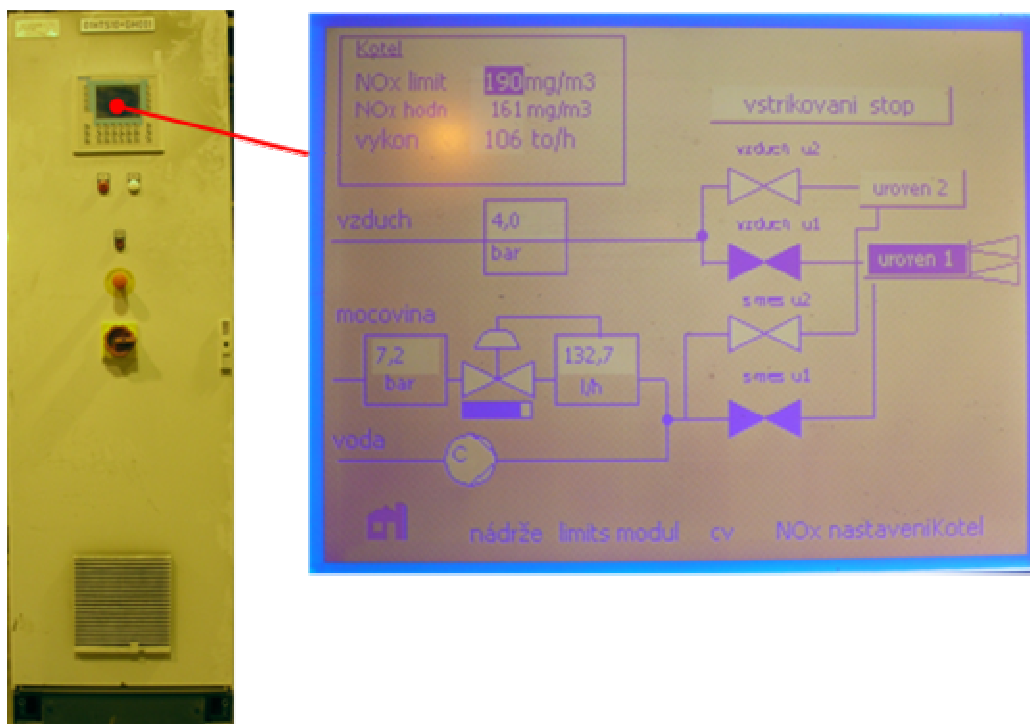
Obr. 24 Řídicí skříň technologie SNCR

Technická data :

Délka	600 mm
Šířka	600 mm
Výška bez podstavce	1800 mm
Provedení	ocelový plech, lak RAL 7035

OP je instalován na skříňových dveřích řídicí skříně. Přes OP probíhá spuštění technologie SNCR, zkouška jednotlivých součástí zařízení v případě manuálního provozu i signalizace jednotlivých poruch.

Prostřednictvím OP je možné testovat všechny funkční stavy zařízení. Zadávat parametrické podrobnosti, popř. řízení OP pomocí menu. Ovládací panel je dotykový displej a tlačítka je možno tedy ovládat dotykem. Ve spodní části je umístěno menu které je ovládáno tlačítka pod příslušnými nápisy, viz **Obr. 25**.



Obr. 25 Základní obrazovka na OP technologie SNCR

6.5 Vstřikování směsi do SK kolte

Na kotli je instalováno celkem 12 trysek ve dvou patrech (viz. **Příloha č.2**), přičemž jednotlivé patro obsahuje 6 trysek. Vstřikovací trysky jsou konstruovány jako dvousložkové (viz. **Kapitola 4**). Pracovní media (vzduch /směs) jsou k tryskám vedeny pomocí potrubí a panceřovaných hadic. Instalace a demontáž trysek je možná aniž by bylo nutno demontovat přívody médií (viz. **Obr. 27**). V následující tabulce je uvedeno označení trysek a jejich umístění na kotli.

Tab. 8 Údaje o instalovaných tryskách

Úroveň č.1			
Počet trysek	Výšková hladina	Pozice	Číslo trysky
4	+17,7 m	Čelní stěna SK	7/8/9/10
2	+16,5 m	Levá /Pravá stěna SK	2/3
Úroveň č.2			
6	+21,8 m	Čelní stěna SK	11/12/13/14/15/16

Technické údaje vstřikovacích trysek:

Hlavní materiál

1.4828/1.4571/HC4

Připojení na spalovací komoru

DN 65/PN6

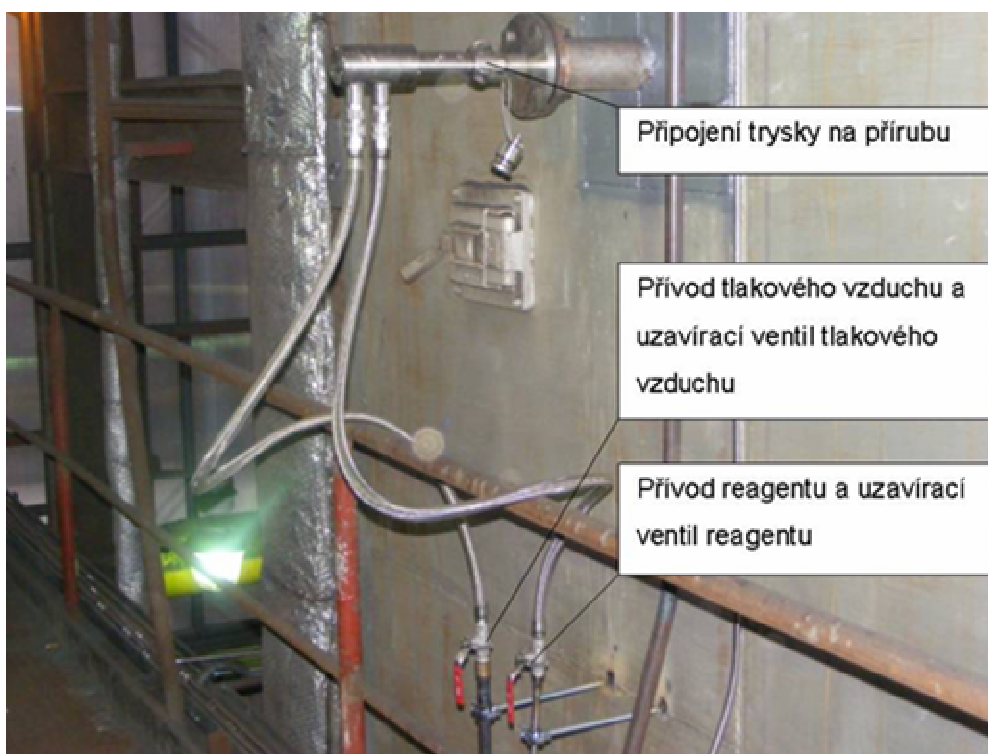


Příruby trysek, patro č.1
Čelní stěna SK



Příruby trysek, patro č.2
Čelní stěna SK

Obr. 26 Prostupy do SK opatřené bajonetovou přírubou



Obr. 27 Zapojení vstřikovací trysky

6.6 Potrubní systémy

Vzhledem k použití agresivní kapaliny, roztoku močoviny, je potřeba potrubní systém provést z ušlechtilé oceli, potrubní trasy ve kterých není veden roztok močoviny je možné realizovat z běžně používaných ocelí.

Potrubí mezi zásobní nádrží a míchacím a měřicím modulem je provedeno z nerezových trubek 26,9x2,6. Části potrubí vedeny mimo prostory budovy kotelny jsou izolovány a vytápěny.

Potrubí přívodu tlakového vzduchu a demivody do míchacího a měřicího modulu je provedeno z trubek DN 20 PN10 běžné konstrukční oceli

Potrubí vedené z míchacího a měřicího modulu ke vstřikovacím tryskám je provedeno pro větev směsi z nerezových trubek DN10 PN10 a pro větev vzduchu z trubek DN15 PN10 běžné konstrukční oceli.

6.7 Regulace technologie SNCR

Při provozu technologie je vstřikování (množství roztoku močoviny) automaticky regulováno pomocí regulačního ventilu DV3.11. Průtokoměrem FIC 3.10 je snímán aktuální průtok roztoku močoviny do směšovacího kusu.

Při realizaci a provozu technologie SNCR vznikají situace, které vyplývají z použití dané regulovatelné veličiny (obsahu oxidu dusnatého). Ta může být měřena až po začátku dávkování (resp. po změně výkonu kotle) s určitým časovým zpožděním.

Aby se co nejvíce zabránilo odchylkám, plynoucím z časového zpoždění, celé vstřikované množství se rozdělí na výkonově stálý podíl (X%) a na podíl (Y%), který se vypočítá prostřednictvím regulačního algoritmu dle závislosti na dané regulační odchylce.

Pro minimalizaci reakce na zpoždění změny oxidu dusnatého ve spalínách je potřeba dopravovat do míchacího a měřicího modulu množství roztoku močoviny v závislosti na daném výkonu kotle, tzv. výkonový průtok roztoku močoviny v l.h^{-1} . Výkonový průtok je minimální množství roztoku močoviny potřebného k redukci emisí NO_x na zadanou hodnotu.

$$m_{výkon} = P * k + C$$

kde:

$m_{výkon}$ je výkonový průtok roztoku močoviny v l.h⁻¹

P je výkon kotle; rozsah 0-100 %

k je variabilně nastavitelný faktor

C je variabilně nastavitelná pevná hodnota

Požadovaná (zadaná) koncová hodnota NO_x je hodnota variabilně nastavitelná na OP řídicí skříň. Skutečná hodnota NO_x je pak měřena instalovaným kontinuálním provozním měřením. Softwarový ovládač pracuje jako PID regulátor, postupně se snaží minimalizovat odchylku skutečné a předepsané hodnoty NO_x. Tím je definováno dodatečné množství roztoku močoviny potřebné ke snížení NO_x. (m_{regul}).

$$m_{reg} = NO_x a - NO_x p$$

kde:

m_{reg} je vstřikované množství roztoku močoviny dle regulační odchylky v l.h⁻¹

$NO_x a$ měřená (aktuální) hodnota čistého plynu v mg. m_N³

$NO_x p$ požadovaná hodnota čistého plynu v mg. m_N³

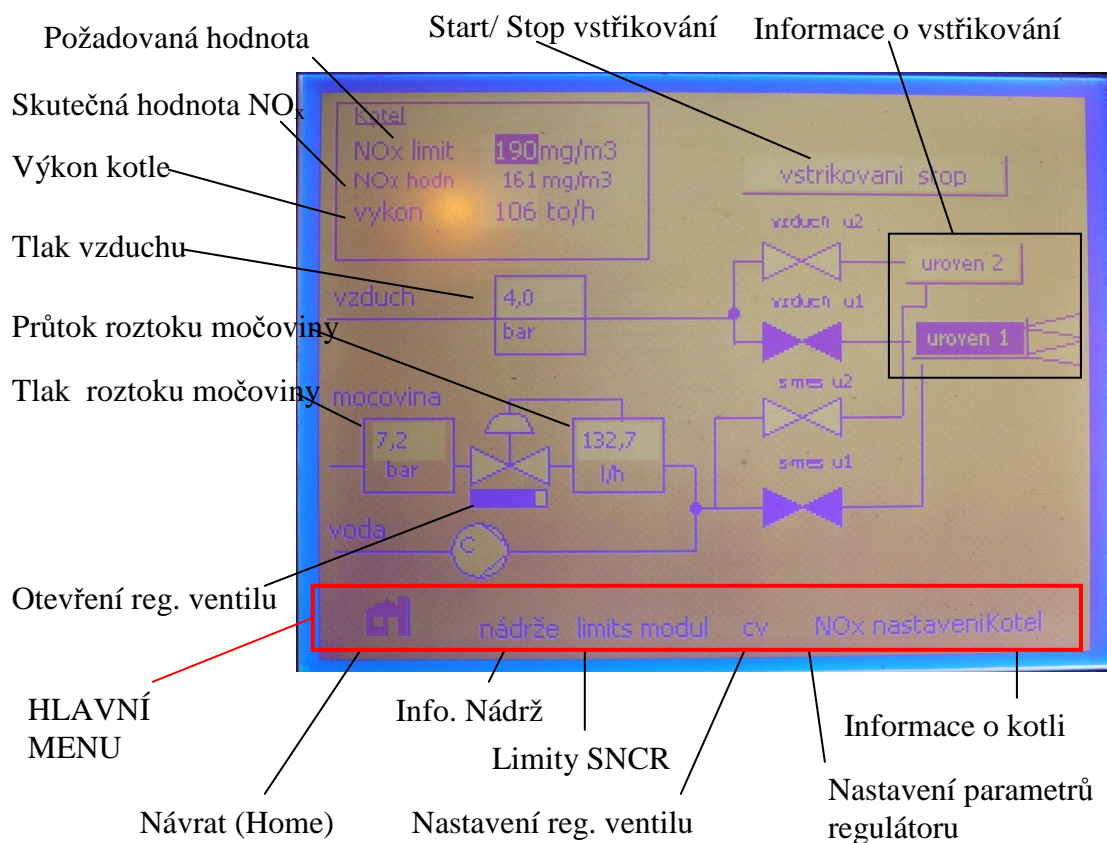
Výsledná celková hodnota průtoku močoviny m_{celk} se rovná součtu hodnot m_{reg} a $m_{výkon}$.

$$m_{celk} = m_{reg} + m_{výkon}$$

Výše uvedené vztahy jsou pouze základními principy regulace technologie a nezahrnují všechny algoritmy, které jsou nutné pro řízení technologie, avšak postačují pro provozování technologie.

6.7.1 Ovládání technologie SNCR

OP je instalován na skříňových dveřích řídicí skříně. Přes tento OP probíhá spuštění zařízení SNCR, zkouška jednotlivých součástí zařízení v případě manuálního provozu i signalizace jednotlivých poruch. Prostřednictvím OP je možné testovat všechny funkční stavy zařízení, zadávat parametrické podrobnosti, apod. Na **Obr. 28** je zobrazena základní obrazovka technologie SNCR, která slouží jako vstup pro ovládání všech zmíněných funkcí technologie. V **Tab. 9** je uveden stručný přehled funkcí a možností základní obrazovky technologie SNCR.



Obr. 28 Základní obrazovka OP technologie SNCR

Tab. 9 Přehled základních funkcí základní obrazovky

Název	Popis funkce
Požadovaná hodnota	obsluhou nastavena požadovaná hodnota emisí NO _x
Skutečná hodnota NO _x	skutečná hodnota NO _x získaná provozním měřením kotle
Výkon kotle	skutečná hodnota výkonu kotle
Tlak vzduchu	aktuální hodnota tlaku vzduchu v technologii SNCR
Průtok roztoku močoviny	aktuální hodnota průtoku močoviny do směšovacího kusu
Tlak roztoku močoviny	aktuální tlak na přívodu roztoku močoviny do modulu
Otevření reg. ventilu	ukazatel aktuálního nastavení regulačního ventilu
Info Nádrž	zobrazí obrazovku o stavu zásobní nádrže
Limity SNCR	zobrazí obrazovku s možností nastavení min. a max. hodnot technologie
Nastavení reg. ventilu	zobrazí obrazovku s možností nastavení parametrů reg. ventilu
Nastavení parametrů regulátoru	zobrazí obrazovku s možností nastavení regulačních konstant
Informace o kotli	zobrazí obrazovku o vybraných hodnotách kotle (výkon, CO, O ₂ , atd.)
Start/Stop vstřikování	stisknutím tlačítka se buď spustí nebo zastaví vstřikování
Informace o vstřikování	ukazatel právě aktivní úrovně vstřikování

6.8 Změna úrovně vstřikování

Na kotli jsou instalovány vstřikovací trysky ve dvou výškových úrovních (viz. **Příloha č. 2** a **Tab. 8**). Dvě úrovně vstřikování zajišťují požadovaný stupeň redukce emisí NO_x v celém provozním rozsahu kotle, tj. od 60% do 100% jmenovitého výkonu kotle. Pro výkonovou hladinu 60% bude prováděn rozstřík směsi v úrovni č.1, neboť z provedeného měření teplot a matematického modelování se teploty vhodné k redukci NO_x nacházejí ve spodních patrech SK kotle. Analogicky pak při výkonu 100% bude prováděn rozstřík v úrovni č.2. Problém tak zůstává určení hodnoty změny vstřikovací úrovně, tj. přepnutí vstřikování z úrovně č.1 na úroveň č.2.

V praxi lze nastavení hodnoty změny úrovně vstřikování realizovat pomocí aktuální hodnoty výkonu kotle nebo pomocí teploty ve SK získané z provozního měření (pokud je měřena). Teplota ve SK je obvykle měřena v oblasti šotových přehříváků.

Firmou ORGREZ, a.s. bylo provedeno srovnávací měření teplot v jednotlivých prostupech s teplotou ve SK (v oblasti šotů) snímanou provozním měřením kotle. Výsledkem byl potvrzen fakt, že teplota ve SK nereaguje výrazně na změnu výkonu kotle a není tak vhodná pro určení změny úrovně vstřikování.

Změna úrovně vstřikování je tak nastavena na aktuální hodnotu výkonu kotle. Z provedených zkoušek při zkušebním provozu technologie SNCR byla určena hodnota změny úrovně vstřikování na 115 t.h^{-1} (tj. ca 85% jmenovitého výkonu kotle), tj. že při provozu kotle pod 115 t.h^{-1} bude aktivní úroveň č.1 a při provozu kotle nad 115 t.h^{-1} bude aktivní úroveň č.2.

Technologie SNCR je nastavena tak aby při poklesu výkonu kotle pod 60%, tj. ca 80 t.h^{-1} , automaticky zastavila vstřikování směsi do SK a při opětovném zvýšení výkonu kotle nad 60% opět spustila vstřikování směsi do SK.

7 Vliv technologie SNCR na účinnost kotle

V následující kapitole je proveden teoretický výpočet účinnosti kotle v režimu bez technologie SNCR a s technologií SNCR. Výpočet je pouze teoretický, neboť v praxi nebylo provedeno měření účinnosti kotle s technologií SNCR a není tak možné výsledky výpočtu porovnat s reálnými hodnotami.

Rozstříkáním směsi roztoku močoviny a demivody pomocí tlakového vzduchu ve SK kotle, jsou do kotle přivedena nová média, která mají nízké vstupní parametry (nízká teplota, tzn. nízká entalpie). Přivedením těchto médií do kotle, kde je mnohem vyšší teplota, dojde vypaření směsi a ohřátí vzduchu (zvýšení entalpie) na parametry v kotli. Na zvýšení entalpie daných médií se využije část tepla přivedeného do kotle, sníží se tak množství tepla využitého na výrobu páry (zvýší se spotřeba paliva), a klesne účinnost kotle.

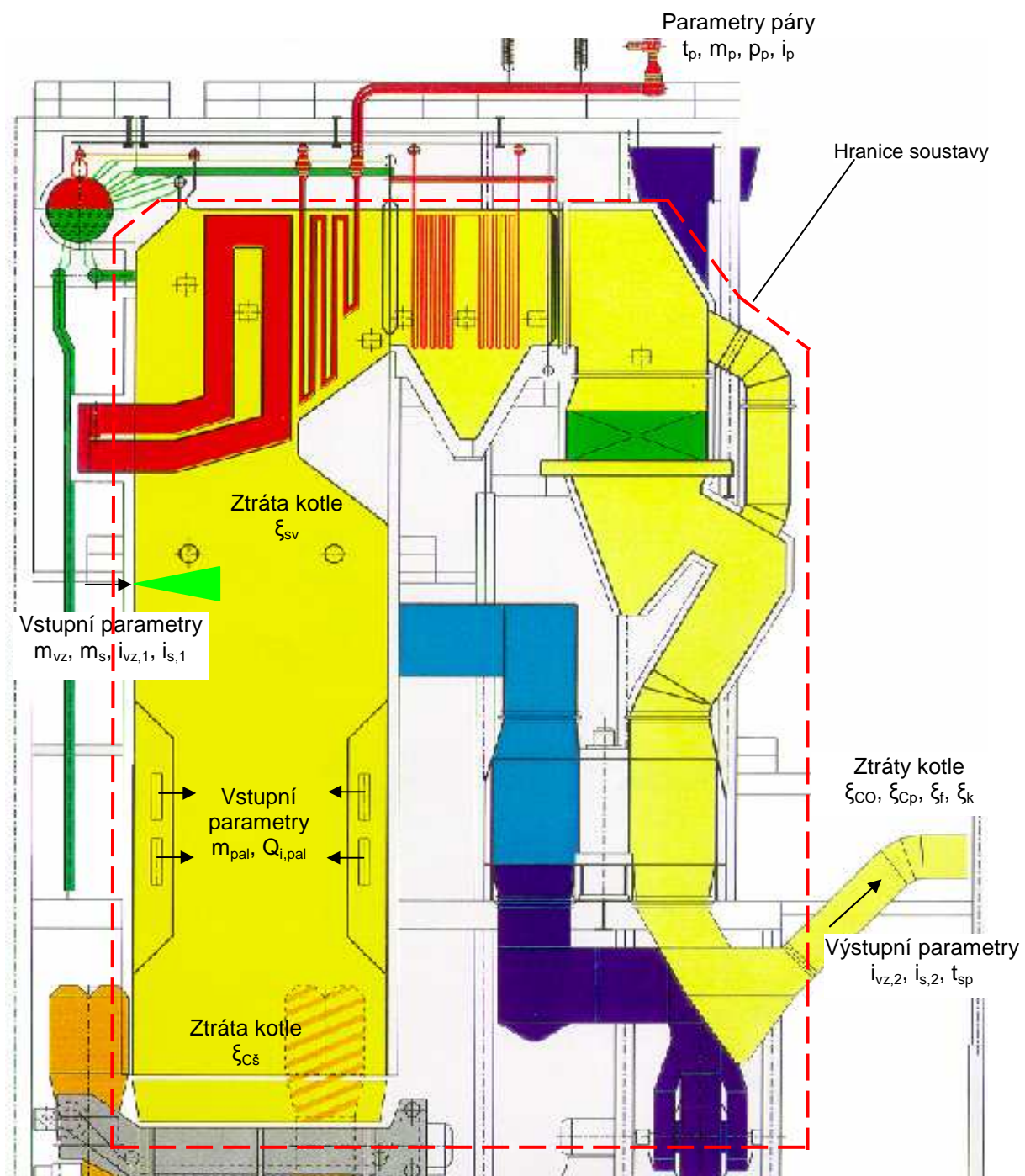
Hodnoty použité pro výpočet byly naměřeny pracovníky VŠB – TU Ostrava pracoviště DEZ katedry energetiky během prováděných spalovacích zkoušek na kotli (dle ČSN 07 03 02 Přejímací zkoušky parních kotlů). Ze získaných dat byly poté použity hodnoty jednotlivých ztrát kotle a dané nastavení jednotlivých toků pracovních médií při daných výkonových hladinách kotle. Tepelný výpočet kotle není náplní této práce a proto byly hodnoty jednotlivých ztrát kotle převzaty.

Hodnoty průtoků pracovních médií technologie SNCR jsou určeny na základě provozu technologie realizovaného firmou ORGREZ, a.s.

Pro určení jednotlivých entalpií pracovních médií byl použit výpočetní program EES.

Pro výpočet je nutné stanovit hranice soustavy a určit tak jednotlivé pracovní média vstupující a vystupující z této soustavy. Schéma soustavy, její hranice a pracovní média jsou uvedeny na **Obr. 1** a v **Tab. 10** jsou pak uvedeny hodnoty zadané pro výpočet.

Výpočet je uveden pouze pro výkonovou hladinu 100%, zbylé výkony 80% a 60% jsou shodně spočteny a v **Tab. 11** jsou pak uvedeny pouze výsledky. Výpočet je realizován v programu MS Excel a tak mohou ve výsledcích nastat drobné nesrovnalosti způsobené zaokrouhlováním v MS Excel.



Obr. 29 Schéma soustavy, hranice, pracovní média [1]

Tab. 10 Vstupní údaje pro výpočet účinnosti kotle

Název	Značka	Jednotka	100%	80%	60%
Parní výkon kotle		$t_{\text{páry}} \cdot \text{h}^{-1}$	135	108	81
Jmenovitý výkon kotle		MW	96,76	77,408	58,056
Teplota páry	t_p	°C		540	
Tlak páry	p_p	MPa		9,41	
Ztráta hořlavinou ve spalínách	ξ_{CO}	%	0,008	0,006	0,004
		MW	0,008	0,006	0,003
Ztráta hořlavinou v popílku	ξ_{Cp}	%	0,642	0,407	0,248
		MW	0,679	0,383	0,187
Ztráta hořlavinou ve škváře	ξ_{Cs}	%	1,083	0,423	0,196
		MW	1,145	0,398	0,148
Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	ξ_f	%	0,219	0,194	0,137
		MW	0,232	0,183	0,103
Ztráta sdílením tepla do okolí	ξ_{sv}	%	0,728	0,805	1,009
		MW	0,770	0,758	0,760
Ztráta komínová	ξ_k	%	8,513	8,004	8,53
		MW	9,002	7,534	6,427
Celkové ztráty	$\Sigma \xi_i$	%	11,193	9,839	10,124
		MW	11,84	9,26	7,63
Množství přivedeného paliva	m_{pal}	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	6,642	5,894	4,353
Výhřevnost paliva	$Q_{i,\text{pal}}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	15920	15970	17310
Teplota spalin za kotlem	t_{sp}	°C	168,5	165,2	164,3
Množství vstřikované vodné směsi roztoku močoviny	m_s	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	556	556	556
		$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0,154	0,154	0,154
Teplota vodné směsi roztoku	t_s	°C	25	25	25
Tlak vodné směsi roztoku	p_s	MPa_{abs}	0,6	0,6	0,6
Entalpie vodné směsi roztoku	$i_{s,1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	105,3	105,3	105,3
Entalpie páry vzniklá ze směsi	$i_{s,2}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2813	2813	2813
Celkové množství vzduchu přivedeného v tryskách	m_{vz}	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	125	125	125
		$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0,035	0,035	0,035
Entalpie vzduchu při 20°C, tlaku 0,4 MPa	$i_{\text{vz},1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	292,7	292,7	292,7
Entalpie vzduchu při teplotě spalin, tlaku 0,096 MPa	$i_{\text{vz},2}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	443,7	443,7	443,7

Výpočet množství přivedené energie v palivu, Q_p :

$$Q_p = \frac{m_{pal} \cdot Q_{i,pal}}{1000} = \frac{6,642 \cdot 15920}{1000} = \underline{\underline{105,74 MW}}$$

Výpočet ztráty vlivem technologie SNCR, ξ_{SNCR} :

$$\xi_{SNCR} = \frac{m_s \cdot (i_{s,2} - i_{s,1}) + m_{vz} \cdot (i_{vz,2} - i_{vz,1})}{1000} = \frac{0,154 \cdot (2813 - 105,3) + 0,033 \cdot (443,7 - 292,7)}{1000} =$$

$$\xi_{SNCR} = \underline{\underline{0,423 MW}} \text{ tj. } 0,40\% \text{ ztráta}$$

Výpočet přivedené energie s technologií SNCR, $Q_{p,SNCR}$:

$$Q_{p,SNCR} = Q_p + \xi_{SNCR} = 105,74 + 0,423 = \underline{\underline{106,16 MW}}$$

Účinnost kotle bez technologie SNCR, η_k :

$$\eta_k = 100 - \Sigma \xi_i = 100 - 11,193 = \underline{\underline{88,81\%}}$$

Účinnost kotle s technologií SNCR, η_{SNCR} :

$$\eta_k = 100 - \Sigma \xi_i - \xi_{SNCR} = 100 - 11,193 - 0,40 = \underline{\underline{88,41\%}}$$

Výpočet spotřeby paliva s technologií SNCR, $m_{p,SNCR}$:

$$m_{p,SNCR} = \frac{Q_{p,SNCR}}{Q_{i,pal}} \cdot 1000 = \frac{106,16}{15920} \cdot 1000 = \underline{\underline{6,669 kg \cdot s^{-1}}}$$

Tab. 11 Výsledky výpočtu účinnosti kotle

Název	Značka	Jednotka	100%	80%	60%
Přivedená energie	Q_p	MW	105,74	94,13	75,35
Přivedená energie se SNCR	$Q_{p,SNCR}$	MW	106,16	94,55	75,77
Ztráta vlivem SNCR	ξ_{SNCR}	%	0,40	0,45	0,56
		MW	0,423	0,423	0,423
Účinnost kotle bez SNCR	η_k	%	88,81	90,16	89,88
Účinnost kotle se SNCR	η_{SNCR}	%	88,41	89,71	89,32
Spotřeba paliva se SNCR	$m_{p,SNCR}$	$kg \cdot s^{-1}$	6,669	5,921	4,377
Rozdíl účinnosti kotle bez a se SNCR	$\Delta\eta$	%	0,40	0,45	0,56
Zvýšení spotřeby paliva se SNCR	Δm_p	$kg \cdot s^{-1}$	0,027	0,027	0,024
		$kg \cdot h^{-1}$	95,75	95,45	88,06

Z výsledků uvedených v předcházející tabulce (**Tab. 11**) je určena tepelná ztráta vlivem technologie SNCR $\xi_{SNCR} = 0,423$ MW shodná pro všechny výkonové režimy kotle (shodné nastavení spotřeby médií technologie). Tepelná ztráta technologie SNCR poté v závislosti na jednotlivých výkonových hladinách určuje množství paliva, které musí být dodatečně přivedeno do kotle. Řádově se jedná o 100 kg paliva za hodinu více než při provozu kotle bez technologie SNCR, toto množství je však z hlediska provozu kotle zanedbatelné.

8 Závěr

Pomocí technologie SNCR lze spolu s primárními opatřeními na snížení tvorby emisí NO_x , dosáhnout požadovaných limitů NO_x dle budoucí platné legislativy.

V práci je uveden celkový popis návrhu technologie SNCR vycházející z provedeného vstupního měření teplot ve SK kotle a matematického modelu spalování. Po určení teplotních polí ve SK jsou navrženy prostupy pro vstřikovací trysky, jejich konstrukce závisí na typu stěn kotle (kapitola 4).

V kapitole 5 je popsána metodika výpočtu minimálního množství aditiva potřebného k požadovanému stupni redukce emisí NO_x . V tomto případě je požadované snížení NO_x z hodnoty 375 mg.m_N^{-3} na 200 mg.m_N^{-3} , tj. stupeň redukce 175 mg.m_N^{-3} . Potřebná spotřeba aditiva (roztoku močoviny) je $117,8 \text{ l.h}^{-1}$. Tato spotřeba je však pouze teoretická při provozu technologie SNCR se spotřeba aditiva pohybuje v rozmezí od 40 l.h^{-1} do 100 l.h^{-1} v závislosti na provozu kotle a nastavení režimu spalování.

Kapitola 6 popisuje základní prvky použité v technologii SNCR, jejich význam a funkci. Dále je zde uveden způsob ovládání a princip regulace technologie.

Kapitola 7 řeší vliv technologie SNCR na účinnost kotle. Ztráty vzniklé rozstříkáním směsi do SK kotle činí $0,423 \text{ MW}$ tepelné energie, která je využita k odpaření směsi. Procentuální hodnota této ztráty činí v průměru $0,47\%$ pro celý rozsah výkonu kotle. Abychom nahradili tepelnou ztrátu vzniklou rozstříkáním směsi, je možné ji přepočítat na množství paliva, které je potřeba dodat navíc do kotle. Jedná se o ca $100 \text{ kg paliva.h}^{-1}$, toto množství je však z hlediska provozu kotle jako celku zanedbatelné.

Technologie SNCR poskytuje nenáročnou alternativu snížení emisí NO_x , kde náklady spočívají pouze v nákupu roztoku močoviny a prvotní investici do celé technologie. Jednoduchá konstrukce všech částí a nenáročný způsob ovládání technologie je zásadní výhodou. Nároky tvoří pouze přivedení pracovních médií, demivody (běžně se vyskytuje na každé kotelně) a tlakového vzduchu (rovněž dostupný ve většině kotlen). Vzhledem ke zpříšňování legislativy a budoucí platnosti limitu NO_x pod 200 mg.m_N^{-3} je technologie SNCR díky své jednoduchosti a cenové nenáročnosti velmi vhodným východiskem pro starší kotle.

9 Použitá literatura

- [1] Materiály ORGREZ, a.s.
- [2] Provozní předpis kotle
- [3] Soubor naměřených hodnot (archiv KE DEZ VŠB)
- [4] BLEJCHAŘ, T., PECHÁČEK, J., MALÝ, R. Predikce polutantů u metody SNCR s močovinou. In *Sborník Mezinárodní konference Energetika a životní prostředí 2009, Ostrava 11.-12.9.2008*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2009, str. 3 - 8. ISBN 978-80-248-2061-3.
- [5] Počítačový program EES
- [6] ON 07 0147 Tepelný výpočet parných kotlov, Návrh oborové normy 1984
- [7] STÁŇA, M. *Výpočetní a diagnostické metody pro snižování emisí NO_x kotlů velkých výkonů*, Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, Disertační práce

10 Seznam příloh

Příloha č. 1 Výkres kotle

Příloha č. 2 Umístění prostupů pro vstřikovací trysky na kotli

Příloha č. 3 Technologické schéma vstřikovací trysky

Příloha č. 4 Technologické schéma zásobní nádrže

Příloha č. 5 Technologické schéma míchacího a měřicího modulu

Příloha č. 6 Seznam použitých měřících prvků

Příloha č. 7 Bezpečnostní list roztoku močoviny